

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DETERMINAÇÃO ÓTIMA DO INTERVALO ENTRE AS**  
**MANUTENÇÕES PREVENTIVAS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**

Dissertação Submetida à Universidade Federal de Santa Catarina  
para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**ANDRÉA LÚCIA COSTA**

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1995

DETERMINAÇÃO ÓTIMA DO INTERVALO ENTRE AS MANUTENÇÕES PREVENTIVAS DE  
EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Andréa Lúcia Costa

‘Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de

**Mestre em Engenharia Elétrica,**

**Área de concentração em Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica**

e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação’



Prof. Jorge Coelho, D. Sc.

Orientador



Prof. Enio Valmor Kassick, Dr.

**Banca examinadora**



Prof. Jorge Coelho, D. Sc - Presidente.



Prof. Edson Luiz da Silva, D. Eng.



Prof. Hans Helmut Zürn. Ph. D.



***A DEUS***

---

*Ao Wilsterman*

*Minha maior paixão*

*Meu único amor*

## AGRADECIMENTOS

*Ao professor Jorge pela paciência, dedicação e amizade durante a orientação deste trabalho.*

*Aos professores da banca examinadora pelas sugestões neste trabalho, em especial ao professor Hans, pelo auxílio na teoria matemática do capítulo 4.*

*Pelas instalações e toda infra-estrutura proporcionadas pela Universidade Federal de Santa Catarina, e pelo carinho e auxílio que sempre recebi de seus funcionários.*

*A todos os integrantes do LABPLAN, aos professores, doutorandos, colegas mestrands, bolsistas e funcionários que com seu bom humor e espírito de colaboração mútua, tornaram o período que estive aqui um tempo tão produtivo quanto agradável.*

*Deixo agradecimentos especiais ao Charles Stuart por sua contribuição ao capítulo 6 e por todas as horas de dedicação à este trabalho.*

*Também agradeço aos engenheiros Airton Silveira e Eduardo Nicolazzi, com os quais tive a oportunidade de realizar o estudo sobre relés de distância eletromecânicos, contribuindo para enriquecer este trabalho.*

*Por fim agradeço a Deus que me trouxe até Florianópolis, onde conheci pessoas maravilhosas, agradeço ao apoio que meu marido Wilsterman, minha irmã Luciene, meus amigos Ana Rosa, Annemarlen, Sílvia, Roberto, Freddy, Gilmar, Cícero, Andriano, Jorge Enrique e Guilherme deram-me nos momentos mais difíceis deste trabalho. Agradeço a todos que estiveram ao meu lado, me apoiando em algum momento, durante os créditos ou durante a fase de dissertação. Levo comigo a lembrança de todos os momentos felizes que passei aqui, e todas as pessoas especiais que conheci.*

Sumário

Nomenclatura ..... viii

Operadores ..... ix

Abreviaturas ..... ix

Resumo ..... x

Abstract..... xi

Capítulo 1. Introdução ..... 1

Capítulo 2. Revisão Bibliográfica ..... 5

Capítulo 3. Terminologia Utilizada ..... 11

3.1 - Introdução ..... 11

3.2 - Tipos de Falhas ..... 11

3.3 - Manutenção de Equipamentos Elétricos ..... 12

Capítulo 4. Modelo de Manutenção Preventiva Mínima utilizando Processos Estocásticos de Markov ..... 16

4.1 - Introdução ..... 16

4.2 - Processos Estocásticos de Markov ..... 16

4.3 - Modelagem das Falhas e das Manutenções..... 20

4.3.1 - Modelagem das Falhas por Deterioração ..... 20

4.3.2 - Modelagem da Manutenção Preventiva..... 24

4.3.3 - Modelagens das Falhas Aleatórias ..... 26

4.4 - Modelos de Markov adotados neste Trabalho .....	28
4.4.1 - Modelo 1 .....	28
4.4.2 - Modelo 2 .....	29
4.4.3 - Modelo 3 .....	30
4.4.4 - Modelo 4 .....	31
4.5 - Algoritmo para o Cálculo do Intervalo entre as Manutenções Preventivas.....	33
<b>Capítulo 5. Análise do Comportamento do OTTM.....</b>	<b>35</b>
5.1 - Introdução .....	35
5.2 - Análise do Comportamento do OTTM.....	35
5.2.1 - Análise Comparativa entre o Modelo 1 e o Modelo 2.....	35
5.2.2 - Modelo 3 - Análise do Parâmetro $r$ .....	41
5.2.3 - Modelo 3 - Influência da Duração da Manutenção Preventiva e do Tempo para as Falhas Aleatórias. 43	
5.2.4 - Análise do Modelo 4 .....	47
5.3 - Utilização do Modelo 4 para representar Relés Eletromecânicos .....	50
5.4 - Conclusões .....	54
<b>Capítulo 6. Predição do MTBF para Sistemas Complexos .....</b>	<b>56</b>
6.1 - Introdução .....	56
6.2 - Definição do MTBF .....	57
6.3 - Algoritmos de Predição do MTBF.....	60
6.3.1 - Algoritmo KLMC.....	60
6.3.2 - Algoritmo SIMUL .....	64
6.4 - Análise das Simulações com os Algoritmos KLMC e SIMUL.....	70
6.4.1 - Descrição do Sistema-teste .....	70
6.4.2 - Análise de Convergência do Algoritmo SIMUL.....	71

6.4.3 - Comparação entre os Algoritmos KLMC e SIMUL..... 73

6.4.4 - Análise de Sensibilidade do Algoritmo SIMUL em relação à frequência e duração das Manutenções preventivas..... 75

6.5 - *Conclusões* ..... 77

**Capítulo 7. Conclusão Gerais..... 79**

7.1 - *Introdução* ..... 79

7.2 - *Conclusões Gerais* ..... 79

7.3 - *Contribuições do trabalho* ..... 82

7.4 - *Sugestões para Trabalhos Futuros* ..... 83

**Apêndice 1..... 85**

**Referências Bibliográficas..... 88**

## Nomenclatura

- $F_0$  ..... Estado de falha aleatória.
- $F_1$  ..... Estado de falha devido à deterioração.
- $r$  ..... número de estágios até ocorrer a manutenção preventiva mínima.
- $k$  ..... número de estágios de deterioração até ocorrer a falha por deterioração.
- $1/\lambda_m$  ..... Tempo médio para a manutenção preventiva (em dias, anos).
- $1/\lambda_m^*$  ..... Tempo médio ótimo para a manutenção preventiva (em dias, anos).
- $1/\lambda_0$  ..... Tempo médio para falha aleatória calculado pelo inverso da taxa de falhas aleatórias (em dias, anos).
- $1/\mu_0$  ..... Tempo médio de reparo para falha aleatória calculado pelo inverso da taxa de reparo após a falha aleatória (em dias, horas).
- $1/\lambda_1$  ..... Tempo médio para falha devido a deterioração do equipamento, calculado pelo inverso da taxa de falhas por deterioração (em dias, anos).
- $1/\mu_1$  ..... Tempo médio de reparo para falha devido ao desgaste (ou deterioração), ou duração da reforma após detectado o desgaste total do equipamento (em dias, horas).
- $1/\mu_m$  ..... Duração da manutenção ou tempo gasto para executar a manutenção (em dias, horas).
- $U$  ..... Indisponibilidade do equipamento, ou expectativa de tempo em que o equipamento permanece fora de operação.
- $P(i,j)$  ..... probabilidade do estado  $(i,j)$  onde  $i$  é o estágio de deterioração ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) e  $j$  é o estágio até a manutenção ( $j = 1, 2, \dots, r, r+1$ ).



$P_{Fo}(i,j)$  .....probabilidade de falha aleatória do estado  $P(i,j)$ .

$P_{Fl}$  .....probabilidade do estado de falha por deterioração (ou desgaste total).

$P(t)$  .....vetor das probabilidades de estado num intervalo  $t$

$A$  .....matriz de transição de estados.

$P^*$  .....vetor das probabilidades de estado estacionário.

$f_i$  .....frequência de se encontrar o estado  $i$ .

$\tau_{k+1}$  .....variável aleatória do tempo total para a falha por deterioração do equipamento (do estado 1 até o estado  $k+1$ ).

## Operadores

$d$  .....indica derivada total.

$\Delta$  .....indica variação incremental de uma grandeza.

$\Sigma$  .....indica somatória de elementos.

$f(\cdot)$  .....função densidade de probabilidade da variável aleatória em questão.

$\mathcal{L}$  .....aplica transformação de Laplace na função.

## Abreviaturas

ABNT .....Associação Brasileira de Normas Técnicas.

MTTF .....*Mean Time to Failure* (tempo médio para falha).

MTTR .....*Mean Time to Repair* (tempo médio de reparo).

MTBF .....*Mean Time Between Failure* (tempo médio entre falhas).

OTTM .....*Optimal Time to Maintenance* (Tempo ótimo para manutenção preventiva).



## Resumo

Programas computacionais que simulam o comportamento de equipamentos elétricos de potência são cada vez mais utilizados. Estes programas computacionais são muito úteis para o planejamento de futuros sistemas, ou para avaliar o desempenho de sistemas já existentes. Este trabalho apresenta dois algoritmos baseados nos processos de Markov. O primeiro algoritmo calcula uma periodicidade para as manutenções preventivas mínimas de um equipamento através da maximização da disponibilidade. O segundo algoritmo procura prever o tempo médio entre falhas para um sistema com vários equipamentos distintos.

Uma política de manutenção preventiva ótima para equipamentos reparáveis é apresentada. Um modelo de Markov é desenvolvido para equipamentos reparáveis operando continuamente, nos quais as suas condições deterioram-se com o tempo de serviço. Caso não seja interrompido, o processo leva à falha devido à deterioração, imediatamente após completar  $k$  estágios de deterioração. Somando-se as falhas por deterioração, o modelo incorpora as falhas de causas aleatórias. Estas falhas podem ocorrer em qualquer momento com uma taxa constante em qualquer estágio de deterioração. O tempo ótimo para manutenção preventiva é determinado através da minimização da indisponibilidade do equipamento devido à manutenção preventiva e devido à ambos tipos de falhas. O modelo assume que a transição para a manutenção preventiva é feita em estágios resultando em tempos para a manutenção preventiva que possuem uma distribuição Erlang.

Após calcular o intervalo ótimo entre as manutenções preventivas de cada equipamento baseando-se no tempo médio para falha devido à deterioração e no tempo médio para falha aleatória, este trabalho apresenta um algoritmo de simulação Monte Carlo para calcular o tempo médio entre as falhas de um sistema complexo.

## Abstract

Computational programs that simulate the behavior of power electric devices are being increasingly utilized. These computational programs are useful for planning future systems, or to evaluate the performance of existent systems. This work presents two algorithms based on Markov's processes. The first algorithm calculates a periodicity to the minimal preventive maintenance of a device by maximizing availability. The second algorithm searches to predict the mean time between failures for a system with various distinct devices.

An optimum preventive maintenance policy is introduced for repairable devices by maximizing availability. A Markov model is developed for repairable devices operating continuously, whose conditions deteriorate with the time in service. If left unattended, the process will lead to deterioration failure, immediately after the completion of  $k$  stages of deterioration. In addition to deterioration failure, the model also incorporates random failure. These failures can occur at any time and at a constant rate in any of the deterioration stages. The optimum time to preventive maintenance is determined by the minimizing of the unavailability of the device due to preventive maintenance and to both types of failure. The model assumes that the transition to preventive maintenance in the Markov model is broken into stages resulting in times to preventive maintenance which have an Erlang distribution.

After calculating the optimal time to preventive maintenance of each device basing in the mean time to failures due to deterioration and mean time to random failure, this work presents a Monte Carlo simulation algorithm to calculate the mean time between failures of a complex system.

# Capítulo I

## 1. Introdução

A fim de atender as exigências do mercado de energia elétrica, as empresas têm se empenhado em aumentar a confiabilidade dos seus sistemas elétricos. Este processo de melhoria engloba desde a geração de energia elétrica nas usinas até os pontos de distribuição de carga, onde a energia é entregue diretamente ao consumidor. Procura-se, assim, garantir o funcionamento adequado dos equipamentos e garantir a continuidade do sistema, elevando os índices de confiabilidade. Desta forma, as empresas têm feito inúmeros investimentos tais como, compras de novos equipamentos, treinamento de pessoal técnico e políticas de manutenções preventivas em seus equipamentos.

Atualmente, devido aos altos custos dos equipamentos elétricos, muito tem-se investido em treinamento de pessoal técnico (a fim de otimizar procedimentos) e em técnicas de manutenção preventiva. Através da manutenção preventiva procura-se acompanhar as condições de operação dos equipamentos e assim, realizar previsões e evitar falhas.

Desta forma, a manutenção se tornou um dos principais destaques em estudos de confiabilidade de sistemas elétricos de potência. Vários estudos têm sido feitos tentando estabelecer métodos para encontrar o melhor intervalo entre as manutenções preventivas das unidades [1] e determinar o fim de sua vida útil. Os modelos utilizados levam em consideração o desgaste dos equipamentos e a sua obsolescência, porém ainda não foi possível desenvolver uma política única que possa ser aplicada na maioria dos equipamentos. Isto ocorre porque os equipamentos elétricos são bastante diversificados quanto a sua utilização e construção, e também



porque mesmo equipamentos iguais podem ser submetidos a condições de tempo e esforços diferentes.

Esta dissertação tem por objetivo apresentar uma metodologia para o cálculo dos intervalos entre as manutenções preventivas de equipamentos elétricos. Nesta metodologia são analisadas separadamente a influência do desgaste (devido à característica construtiva do equipamento) e a influência de fatores externos e aleatórios ao funcionamento do equipamento, como será apresentado nos capítulos seguintes.

No Capítulo 2, são comentadas algumas das várias políticas de manutenção preventiva estudadas durante a revisão bibliográfica sobre o assunto. Foi observada uma grande variedade de conceitos adotados por diversos autores, que em alguns casos, até divergem entre si. Assim, o Capítulo 3 apresenta os principais conceitos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, procurando adequar a terminologia utilizada na literatura internacional com alguns conceitos padronizados pela ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, em sua tentativa de criar uma terminologia de manutenção padrão para as concessionárias brasileiras.

Algumas políticas de manutenção preventiva utilizam critérios determinísticos, formulados em termos de margens de segurança, porém estas políticas apresentam sérias limitações, pois não levam em conta a natureza aleatória dos diversos fenômenos que afetam os equipamentos. Ao contrário, políticas de manutenção baseadas em princípios probabilísticos podem, não somente refletir melhor a natureza aleatória dos tempos em operação dos equipamentos, como também possibilitar uma redução nos custos esperados da manutenção.

No Capítulo 4 é apresentado um método para obtenção de um intervalo ótimo entre as manutenções preventivas de equipamentos. É utilizado um modelo estocástico de Markov para representar equipamentos reparáveis operando continuamente, nos quais suas condições deterioram-se com o tempo de serviço, isto é, a deterioração é um processo no qual a condição do equipamento piora gradualmente e de modo mensurável, até levá-lo à falha por deterioração.

Somando-se às falhas por deterioração, o modelo incorpora as falhas aleatórias. Estas falhas podem ocorrer em qualquer momento e ocorrem com uma taxa constante em qualquer estágio de deterioração. Desta forma, pode-se observar a influência de processos aleatórios tais como chuvas, ventos, raios, ou frequência de acidentes causados por pessoas ou animais. A modelagem das falhas aleatórias distingue os processos de falha de equipamentos iguais, porém, localizados em regiões diferentes.

Após a ocorrência de uma falha aleatória ou por deterioração, o equipamento é restaurado e retorna a operação, no qual o tempo de reparo depende do tipo de falha. O intervalo ótimo entre as manutenções preventivas é determinado através da minimização da indisponibilidade do equipamento devido à manutenção preventiva e ambos tipos de falhas. São apresentados no Capítulo 4, as variantes do modelo estocástico de Markov, considerando diferentes formas de manutenção e reparo.

O Capítulo 5 apresenta uma análise da influência do desgaste e das falhas aleatórias nos modelos apresentados, através da análise de alguns exemplos onde a metodologia foi aplicada. É apresentada ainda uma aplicação de um dos modelos de Markov para o cálculo dos custos da manutenção de relés de distância eletromecânicos. Estes equipamentos tiveram sua característica original de operação alterada pela troca dos capacitores a óleo por capacitores de poliéster, modificando seu processo de deterioração. O objetivo é avaliar a utilização dos capacitores de poliéster, comparando os custos agregados a este capacitor com os custos agregados ao capacitor de óleo. É feita também uma análise dos gastos com a manutenção preventiva do equipamento e uma comparação entre estes dois tipos de equipamentos (com capacitor a óleo e capacitor a poliéster) que possuem características semelhantes, mas divergem em relação à frequência das manutenções.

No Capítulo 6 tem-se uma contribuição ao trabalho, apresentando um algoritmo para predição do tempo médio entre as falhas de um sistema elétrico, num dado intervalo de tempo.

Neste algoritmo, o cálculo do tempo médio entre as falhas do sistema considera os tempos para falha devido ao desgaste de cada equipamento, o efeito das ações de manutenção preventiva e a probabilidade de ocorrência de falhas de causas aleatórias. Também são considerados os tempos para reparo ou troca após as falhas e a duração das saídas para manutenção preventiva. O algoritmo utiliza a técnica de Simulação Monte Carlo para obter valores para os tempos em operação de cada equipamento a partir dos valores médios do tempo para falha devido ao desgaste e intervalo entre as manutenções preventivas. É assumida a distribuição Normal para essas variáveis aleatórias. Outras hipóteses são assumidas para o algoritmo, procurando aproximar a simulação computacional da operação real de um sistema elétrico e fornecer um valor de tempo médio em operação para este sistema.

Finalmente, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões gerais obtidas no desenvolvimento deste trabalho e as sugestões para trabalhos posteriores.



## Capítulo II

### 2. Revisão bibliográfica

Nos últimos anos, a manutenção de equipamentos elétricos adquiriu um papel de destaque dentro das concessionárias de energia elétrica, empresas do setor e indústrias. Através da manutenção é possível garantir que os equipamentos permaneçam em boas condições de operação, evitando assim as falhas, reduzindo os custos com trocas de equipamentos e mantendo os níveis de confiabilidade do sistema.

Desde então, inúmeros métodos de manutenção têm sido desenvolvidos e publicados. Entretanto, quando se considera a manutenção de equipamentos de sistemas de potência, verifica-se que ainda não foi possível desenvolver uma política única que possa ser aplicada na maioria dos equipamentos, seja pela diversidade dos equipamentos ou devido aos vários fatores que podem ser levados em consideração. A política de manutenção depende muito do enfoque considerado. Algumas políticas de manutenção priorizam o enfoque econômico, analisando os custos da manutenção em conjunto com outros custos, como por exemplo, custos com a substituição de equipamentos. Outras políticas priorizam a disponibilidade do equipamento, ou seja, o tempo máximo que o equipamento possa estar em operação no sistema. Mas, em quase todos os métodos de manutenção, a dificuldade encontra-se em determinar a frequência das inspeções ou quais itens devem ser inspecionados. Além disso, os aspectos estocásticos do problema devem também ser considerados.

Dentre os vários trabalhos que priorizam o enfoque econômico da manutenção, deve-se citar o livro de Barlow e Proschan [2] publicado em 1965, no qual é apresentado um estudo sobre manutenção e troca de equipamentos, considerando dois tipos de custos. O primeiro custo

representa a soma de todos os custos resultantes de uma falha num equipamento e dos reparos realizados para eliminar esta falha (custos com a restauração). O segundo custo representa a soma dos custos relacionados com a manutenção em equipamentos que não apresentaram falhas, ou seja, sofreram manutenção antes da falha (custos com a manutenção preventiva). Desde que o custo com a restauração após as falhas seja maior que o custo com a manutenção preventiva, esta política de manutenção é vantajosa, e o custo total esperado da manutenção será a soma de cada custo, ponderado respectivamente pelo valor esperado do número de falhas em equipamentos e pelo valor esperado do número de manutenções. Neste estudo, procurou-se minimizar o custo total esperado.

Durante anos Nakagawa publicou trabalhos em revistas especializadas, como IEEE Transactions on Reliability, sobre modelagem matemática da manutenção preventiva em equipamentos. Em 1979, Nakagawa publicou um trabalho [3] sobre uma política de manutenções preventivas na qual, se um equipamento falha, este é restaurado através de um reparo mínimo. Esta política foi denominada de manutenção preventiva imperfeita, pois, se a unidade falha, é instantaneamente restaurada, porém permanece na mesma curva de taxa de falha que tinha antes da falha. O tempo de vida, ou idade original, não muda. Além de reparo mínimo, este procedimento é também conhecido como *as bad as old* (tão ruim quanto velho).

Park [4] em 1988 apresentou um trabalho baseado na troca de equipamentos, cujo fator determinante para a troca do equipamento foi o *wear limit* (limite de uso), determinado através de inspeções periódicas. Foram analisados os custos da troca, das inspeções e das perdas quando ocorre um falha.

Outro trabalho publicado mais recentemente sobre análise de custos em manutenção de equipamentos, foi o trabalho de Ebrahimi ([5], 1993) que procurou incorporar custos em modelos de manutenção que utilizam o conceito de IFRA-*increasing failure rate in average* (taxa de falha crescente média). Se um componente falha, são apresentados dois procedimentos: trocar todo o



equipamento, ou trocar apenas o componente falhado, ou seja, reparar o equipamento. Esta escolha depende da análise dos seguintes fatores:

- tempo de vida de um novo equipamento;
- tempo de vida restante do velho equipamento, se este é restaurado no instante da falha;
- custo de um novo equipamento;
- custo do reparo do equipamento no instante da falha.

Muitos pesquisadores priorizam o enfoque econômico considerando os custos como o aspecto mais importante em políticas de manutenção preventiva. Porém, mesmo quando o fator econômico não é abordado explicitamente, ele é considerado, principalmente no que se refere a sistemas reparáveis. Por exemplo, quando se procura aumentar a disponibilidade do equipamento, ou melhorar seus índices de confiabilidade, a consequência destes procedimentos é uma economia com a redução de saídas não programadas e interrupção do fornecimento, redução de gastos desnecessários com material e pessoal, aumento da vida útil dos equipamentos, entre outros fatores.

Elaborar um modelo matemático para que este represente mais fielmente o funcionamento dos equipamentos elétricos e os procedimentos de manutenção adotados nas empresas é um dos grandes desafios para engenheiros e pesquisadores. As atuais práticas de manutenção preventiva ainda estão distantes das pesquisas. A prática usa o "bom senso" (intuição baseada em conhecimentos e/ou acontecimentos passados) enquanto a pesquisa muitas vezes implica assumir modelos simplificados. Tenta-se modelar o desgaste, o trabalho ininterrupto, as falhas aleatórias e os efeitos práticos da manutenção preventiva na confiabilidade do equipamento. Talvez a maior dificuldade seja a de conseguir modelar a função risco de falha à qual os equipamentos estão sujeitos. Vários estudos sobre confiabilidade de sistemas reparáveis [6-9] comprovam que nem sempre o modelo constante para a função risco de falha, embora tão difundido na literatura, é o mais adequado.

Muitas empresas estão começando a desenvolver bases de dados como guias para avaliar a confiabilidade de equipamentos importantes, tais como, transformadores e religadores. Para isso utilizam dados coletados de falhas, bem como o número de equipamentos expostos à falha por um longo período de tempo. Com estes dados pode-se investigar as causas das falhas e as tendências a longo prazo, e também investigar a confiabilidade do equipamento em relação à idade.

Em muitos métodos assume-se a análise determinística para os eventos programáveis, ou seja, considera-se que a ação da manutenção preventiva não é aleatória. Porém, sabe-se que uma falha ocasional pode resultar na substituição de um equipamento ou componente, alterando as condições de operação do sistema. Além disso, a programação para a manutenção preventiva nem sempre é rígida, as inspeções podem ser adiadas ou até canceladas de acordo com as prioridades das equipes de manutenção, fazendo com que os intervalos entre as manutenções sejam aleatórios. Como a manutenção preventiva deve ser feita para detectar a deterioração do equipamento antes que ocorra a falha, muitas vezes esta manutenção é realizada sem que seja comprovada a necessidade de revisão ou troca de componentes no equipamento. Desta forma, políticas de manutenção baseadas em princípios probabilísticos podem não somente refletir a natureza aleatória dos tempos de operação dos equipamentos, mas também permitir uma economia substancial nos custos da manutenção.

O envelhecimento de um equipamento não é um processo instantâneo, mas ocorre de forma lenta, de acordo com a utilização do equipamento. Proctor e Wang [10] em 1975, apresentaram um estudo sobre o processo de deterioração de equipamentos elétricos baseado em processos estocásticos de Markov. O envelhecimento do equipamento é representado através de vários estágios nos quais o equipamento está se deteriorando, alterando as suas características e reduzindo a sua confiabilidade, mas ainda está funcionando, até alcançar o estado de falha ocasionada pelo desgaste total.



Em [11] diz-se que um equipamento sofre um desgaste somente quando está em operação, mas está sujeito à falha aleatória durante todo o tempo. Assim, as falhas acontecem devido ao desgaste e às causas aleatórias. Considere um pneu de carro como exemplo. Um pneu pode falhar devido ao desgaste, porém um prego no caminho pode ser uma causa para uma falha aleatória. Mas, para qualquer prego, a probabilidade de furar um pneu novo é menor do que a probabilidade de furar um pneu velho. Da mesma forma, a falha de um equipamento elétrico é o resultado da composição das ações aleatórias com o desgaste do próprio equipamento.

Assim, em 1988, Sim e Endrenyi [12] estenderam o modelo de Proctor para representar outros estados do equipamento, como os estados de falhas aleatórias e os estados em que o equipamento está em manutenção. Neste modelo, a ação da manutenção preventiva não retorna o equipamento para a condição semelhante a de um equipamento novo, mas para um estágio de deterioração menor ao que se encontrava antes da manutenção. Estes tempos para manutenção preventiva possuem distribuição Erlang e quando o parâmetro Erlang tende para o limite, estes tempos podem ser considerados determinísticos. Utilizando este modelo, Sim e Endrenyi desenvolveram um algoritmo que busca o intervalo ótimo entre as manutenções preventivas, determinado através da minimização da indisponibilidade do equipamento devido à própria ação da manutenção e devido às falhas. São utilizados os tempos médios para falhas por desgaste e para falhas aleatórias, e os tempos médios para reparo após as falhas e a duração da manutenção preventiva. O modelo matemático de Sim e Endrenyi foi adotado no desenvolvimento deste trabalho, sendo implementado computacionalmente, considerando-se os diferentes tipos de reparos após a falha aleatória: substituição (ou troca) e reparo mínimo, além de incorporar outras considerações. Além do estudo e implementação computacional deste modelo matemático para manutenção preventiva em equipamentos elétricos, nesta dissertação avalia-se também a influência no MTBF de um sistema elétrico devido à estes tipos de falha.

O MTBF-*Mean Time Between Failures* (tempo médio entre as falhas) é geralmente usado como medida da confiabilidade de sistemas reparáveis. Predizer o MTBF é um importante aspecto

no estágio inicial do desenvolvimento de um sistema e pode ser usado para avaliar o desempenho de sistemas já existentes. Entretanto, é geralmente difícil prever o MTBF do sistema durante um dado intervalo de tempo, quando os processos de falha são extremamente complexos. Assim, em 1989, Kim apresentou um trabalho [14] no qual procurou-se uma nova definição para o MTBF, derivando as relações entre as propriedades do MTBF para uma unidade considerando apenas os estados de operação e falha e as propriedades destas unidades quando em sequência (em série ou paralelo).

Em 1992, Kim, agora juntamente com Lee, apresentou um algoritmo de simulação MONTE CARLO [15] para calcular o MTBF durante um dado intervalo de tempo, para um sistema com unidades operando a dois estados. Neste estudo, considerou-se apenas um valor para o MTTF-*Mean Time to Failure* (tempo médio para falha) de cada equipamento e o tempo para reparo foi desconsiderado.

A partir do algoritmo desenvolvido por Kim e Lee, foi implementado nesta dissertação, um outro algoritmo no qual o cálculo do MTBF do sistema considera tanto o tempo médio para falha devido à deterioração quanto as saídas de operação obrigatórias devido à manutenção preventiva. Além destes tempos, também é considerada a probabilidade de falhas aleatórias e os tempos de reparo devido às falhas. Deste modo, este procedimento procura analisar tanto a influência das falhas aleatórias quanto a falha por desgaste nos equipamentos a partir de um modelo Markoviano.

## **Capítulo III**

### **3. Terminologia Utilizada**

#### **3.1- Introdução**

Apesar das inúmeras tentativas para estabelecer uma terminologia padrão para os todos métodos de manutenção [16], ainda não existe consenso entre as empresas, organizações e nem mesmo entre pesquisadores brasileiros ou do exterior. Durante o estudo bibliográfico foram encontradas divergências em definições básicas relacionadas ao estudo da manutenção, tais como, falha, defeito, manutenção e reparo, além de definições essencialmente iguais, porém com nomes diferentes. Assim, este capítulo destina-se a relacionar os principais conceitos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

#### **3.2- Tipos de Falhas**

Embora alguns autores associem falha e defeito como sinônimos, este trabalho adota a distinção entre os dois termos como aparece em [17]. Denominam-se falhas as ocorrências nos equipamentos que impedem o seu funcionamento. Os defeitos são ocorrências nos equipamentos que não impedem o seu funcionamento, mas podem, a curto ou longo prazo, acarretar a sua indisponibilidade.

Neste trabalho, entende-se por falhas a perda parcial ou total de um ou mais componentes de um equipamento, ou ainda uma modificação em suas propriedades que reduz totalmente as suas condições de trabalho. Assim, as falhas nos equipamentos, inevitavelmente acarretam em indisponibilidade e perda de continuidade.



As falhas podem ser classificadas como dependentes ou independentes. Caso a falha de um equipamento qualquer é ocasionada pela falha de outro equipamento, esta falha será do tipo independente. Se a falha de um equipamento for ocasionada por falha em outro equipamento, esta falha é considerada dependente. No desenvolvimento deste trabalho serão consideradas apenas as falhas independentes.

Neste trabalho são consideradas principalmente dois tipos distintos de falhas, devido a sua natureza:

- **Falha aleatória:** é aquela cuja causa não pode ser determinada senão após a ocorrência da falha. É uma falha que não pode ser prevista embora possa ser determinada uma probabilidade de ocorrência para a mesma (algumas vezes também é denominada de falha de causas externas);

- **Falha por desgaste:** é a falha causada pelo desgaste do próprio equipamento (falhas internas, devido à característica construtiva do equipamento). Estas falhas podem ser previstas através da observação das condições de operação e desta forma, podem ser evitadas ou reduzidas.

### 3.3- Manutenção de Equipamentos Elétricos

A manutenção de equipamentos elétricos pode ser definida como uma combinação de ações conduzidas para substituir, reparar, revisar ou modificar equipamentos elétricos ou seus componentes de modo que estes operem dentro de uma disponibilidade especificada, em um intervalo de tempo também especificado. Segundo especificação da ABNT [17], a manutenção ocorre para a eliminação de defeitos ou falhas e pode ser dividida em manutenção preventiva e manutenção corretiva:

- A **manutenção preventiva** é responsável pela continuidade do serviço do equipamento e engloba inspeções periódicas para verificação das condições de operação do equipamento, ajustes, conservação e eliminação de defeitos. É uma atividade que pode ser programada antecipadamente para que ocorra em intervalos de tempo pré-estabelecidos, embora não

necessariamente iguais, sendo por isso também chamada de **manutenção programada**. Algumas vezes a ação da manutenção preventiva também varia em função da monitoração de certos parâmetros de funcionamento do equipamento. Neste caso tem-se a **manutenção preventiva-preditiva** [18].

- A **manutenção corretiva** é responsável pela restauração de um equipamento fora de serviço devido à falha. Como não é possível prever quando ocorrerá uma falha em um equipamento ou parte do sistema e devido à urgência em reestabelecer o funcionamento do sistema nestas ocasiões, a manutenção corretiva também é conhecida como **manutenção forçada**.

Vários métodos de manutenção têm sido desenvolvidos e procuram a melhor política a ser adotada em cada situação. Para as situações forçadas deve-se decidir entre substituir o equipamento falhado ou simplesmente repará-lo, eliminando a falha e retornando-o à operação. Para as situações programáveis, a dificuldade encontra-se em determinar a frequência das inspeções ou quais itens devem ser inspecionados, levando em consideração o custo e evitando deixar equipamentos importantes fora de operação desnecessariamente.

As políticas de manutenção diferenciam-se pelas práticas adotadas numa situação emergencial e numa situação programada. Basicamente existem três procedimentos [19]:

- **Substituição** no qual realiza-se a troca completa do equipamento ou de seus componentes de modo que o equipamento retorne a operação tão bom quanto um novo (*as good as new*), melhorando os índices de confiabilidade;

- **Reparo mínimo** no qual inspeciona-se o equipamento e repara ou troca-se apenas os componentes falhados ou com defeito, garantindo que o equipamento possa continuar funcionando por mais algum tempo. Neste caso, a confiabilidade do sistema é essencialmente a mesma imediatamente antes da falha ou da manutenção preventiva ocorrer (*as bad as old*);

- **Reforma** na qual faz-se trocas de componentes e reparos, de modo a melhorar os índices de confiabilidade do equipamento, embora não tanto como na substituição.

Assim, para um equipamento com uma taxa de falha crescente no tempo, a influência na tendência desta taxa de falha devido aos procedimentos citados anteriormente pode ser vista na Figura 3.1 [19]. Observa-se que o reparo mínimo não afeta a tendência original da taxa de falha do equipamento. Por outro lado, a reforma reduz a tendência da taxa de falha, mas não reduz até o seu valor inicial, isto ocorre apenas com a substituição completa do equipamento, no qual a taxa de falha retorna para o valor inicial.

Geralmente, os reparos mínimos são feitos após a falha do equipamento, com o intuito de retornar o sistema para a operação o mais rapidamente possível, e a substituição ou reforma é feita em intervalos pré-determinados de manutenção preventiva, pois são ações mais demoradas.

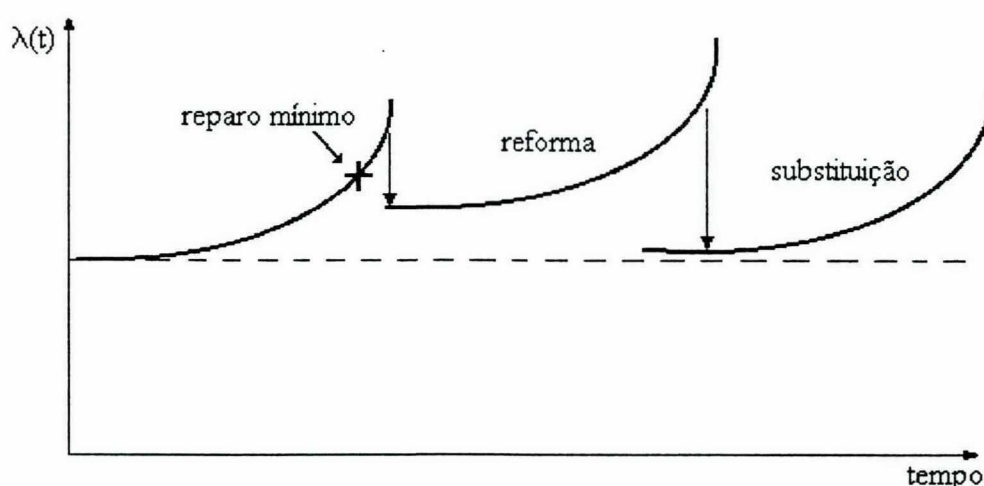


Figura 3.1 - Efeito do reparo mínimo, da reforma e da substituição na tendência da taxa de falha.

No modelo adotado para este trabalho, após uma falha por desgaste, o equipamento é reformado e considera-se seu retorno para o estágio inicial de deterioração, semelhante à substituição. A manutenção preventiva é considerada mínima, pois retorna o equipamento para apenas um estágio de deterioração anterior ao que se encontrava o equipamento antes da



manutenção preventiva ocorrer. Se ocorre uma falha aleatória, podem ser adotados dois procedimentos para corrigir a falha, reforma ou reparo mínimo, de acordo com as necessidades e prioridades do sistema.

## Capítulo IV

### 4. Modelos de Manutenção Preventiva utilizando Processos Estocásticos de Markov

#### 4.1 - Introdução

Processos estocásticos de Markov são bastante utilizados em estudos de confiabilidade de sistemas elétricos para representar a operação de um ou mais equipamentos. Neste capítulo, os processos estocásticos de Markov são utilizados para representar o funcionamento de um único equipamento representando suas condições de operação (novo, degradado), seus estados de falha (falha devido ao desgaste, falha de causa aleatória), estados de reparo e os estados de manutenção preventiva. São apresentados quatro diferentes modelos de Markov e o algoritmo para o cálculo do tempo ótimo entre as manutenções preventivas, calculado através da otimização do tempo em operação do equipamento.

Estes modelos de Markov podem ser utilizados para representar o processo de deterioração/manutenção preventiva/reparo de máquinas rotativas e unidades geradoras, nos quais o tempo de reparo das falhas não pode ser desprezado, frente ao tempo entre as falhas.

#### 4.2 - Processos Estocásticos de Markov

Em termos gerais, um processo estocástico é um fenômeno que varia, dentro de uma certa faixa, de uma maneira imprevisível com o passar do tempo [20]. Por exemplo, realiza-se um experimento  $E$  com resultados  $\xi$  formando um espaço de estados  $X$  com subconjuntos

denominados eventos, aos quais se associam probabilidades. Se a cada resultado  $\xi$  se puder associar uma função temporal

$$x(t, \xi)$$

então à família destas funções se dá o nome de processo estocástico.

Assim, um processo estocástico é uma função de duas variáveis  $t$  e  $\xi$ . Caso o intervalo de tempo seja tal que as medidas sejam feitas continuamente, fala-se de um processo estocástico a parâmetros contínuos. Se as observações forem feitas a determinados intervalos de tempo, tem-se um processo estocástico a parâmetros discretos.

Um processo de Markov é um processo estocástico cujo passado não tem influência no futuro se o presente estiver especificado, ou seja, a probabilidade de um sistema se situar num certo estado, num dado instante  $t_2$ , pode ser deduzida a partir do conhecimento do estado num certo instante anterior  $t_1$ . Desta forma, os modelos Markovianos são classificados conforme ilustrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Processos de Markov

parâmetro $t$	espaço de estado $X$	
	discreto	contínuo
discreto	cadeia de Markov a parâmetro discreto	processo de Markov a parâmetro discreto
contínuo	cadeia de Markov a parâmetro contínuo	processo de Markov a parâmetro contínuo

Conforme mostrado na Tabela 4.1, as cadeias de Markov a parâmetros contínuos são processos Markovianos de estados discretos e tempos contínuos, especificada em termos das probabilidades de estado e das probabilidades de transição entre um estado e outro, também

chamadas de taxas de transição de estados. O exemplo mais simples de cadeias de Markov é aquele cujo espaço de estados consiste somente de dois estados. Estes espaços podem ser rotulados como “sucesso” e “fracasso”, 0 ou 1, ou quando se trata de equipamentos, como “operação” e “falha”. Este modelo é simples e muito utilizado em estudos de confiabilidade de sistemas elétricos, embora nem sempre seja o mais apropriado. A Figura 4.1 ilustra uma cadeia de Markov a 2 estados, representando o funcionamento de um equipamento. Este tipo de representação é chamado de diagrama de estados de Markov e neste caso,  $\lambda$  é a taxa de transição (taxa de falha) do estado de operação para o estado de falha e  $\mu$  (taxa de reparo) é a taxa de transição do estado de falha para o estado de operação.

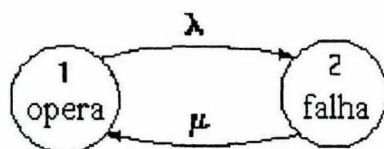


Figura 4.1 - Diagrama de estados de uma cadeia de Markov para um equipamento a 2 estados.

Uma cadeia de Markov possui as seguintes propriedades [20, 21]:

- O sistema (no caso, o equipamento) pode ser descrito como estando em um estado de um conjunto de estados  $X_i$ , discretos e mutuamente exclusivos;
- As trocas de estado são possíveis em qualquer intervalo de tempo;
- A probabilidade de saída de um estado depende somente do estado atual;
- A probabilidade de mais do que uma troca durante o intervalo infinitesimal de tempo é desprezível.

Caso as taxas de transição sejam constantes ao longo do tempo, o processo Markoviano é dito homogêneo.

As probabilidades de encontrar um equipamento (ou sistema) com  $n$  estados, em qualquer estado  $i$  em um tempo  $t+\Delta t$  podem ser calculadas pela equação [1]:



$$P_i(t + \Delta t) = P_i(t) \cdot \left[ 1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda_{i,j} \Delta t \right] + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_j(t) \lambda_{j,i} \Delta t \quad (4.1)$$

Onde:  $P_i(t)$  = Probabilidade do equipamento estar no estado  $i$  no tempo  $t$ ;

$\lambda_{i,j}$  = taxa de transição ou taxa de saída do estado  $i$  para o estado  $j$ ;

$\lambda_{i,j} \Delta t$  = probabilidade de transição do estado  $i$  para o estado  $j$  no intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Esta equação é derivada da equação de Chapman-Kolmogorov [1, 20, 22]. O primeiro termo do lado direito da igualdade representa a probabilidade de estar no estado  $i$  em  $t$  e não sair deste estado durante  $\Delta t$ . O segundo termo é a probabilidade de estar no estado  $j$  em  $t$  e ir para o estado  $i$  durante  $\Delta t$ . Escrevendo a equação 4.1 de outra forma, obtém-se:

$$\frac{P_i(t + \Delta t) - P_i(t)}{\Delta t} = -P_i(t) \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda_{i,j} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n P_j(t) \lambda_{j,i}$$

Fazendo  $\Delta t \rightarrow 0$ , obtém-se o limite:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -P_i(t) \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda_{i,j} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n P_j(t) \lambda_{j,i} \quad (4.2)$$

que escrita em sua forma matricial:

$$\frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P}(t) \quad (4.3)$$

onde  $\mathbf{P}(t)$  é o vetor coluna e  $\mathbf{A}$  é a matriz de transição de estados. Em muitas aplicações, o interesse é calcular as probabilidades de estado estacionário do sistema. Para cadeias de Markov a parâmetros contínuos, essas probabilidades podem ser definidas pela seguinte expressão [1]:

$$P_i^* = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t) \quad (4.4)$$

Se  $t$  torna-se elevado, a derivada do vetor  $\mathbf{P}(t)$  é nula e o vetor  $\mathbf{P}(t)$  passa a ser o vetor das probabilidades de estado estacionário  $\mathbf{P}^*$ . Logo, o conjunto de equações diferenciais (equação 4.3) reduz-se a um conjunto de equações lineares da forma:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{P}^* = \mathbf{0} \quad (4.5)$$

Pode-se mostrar que a soma dos elementos de cada linha de  $A$  é nula e seu determinante também é igual a zero. Assim, para resolver este sistema torna-se necessária uma equação adicional, dada pela soma das probabilidades de todos os estados que deve ser igual a 1.

$$\sum_j P_j^* = 1 \quad (4.6)$$

Outro método para calcular o vetor  $P^*$ , pode ser através do método do balanço de frequências [23]. A frequência de se encontrar um estado  $i$  do sistema pode ser obtida pela expressão:

$$f_i = P_i^* \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda_{i,j} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_j^* \lambda_{j,i} \quad (4.7)$$

Onde:  $P_i^*$  = Probabilidade de estado estacionário do equipamento residir no estado  $i$ ;

$\lambda_{i,j}$  = taxa de saída do estado  $i$  para o estado  $j$ ;

$P_j^*$  = Probabilidade de estado estacionário do equipamento estar em qualquer estado  $j$ ;

$\lambda_{j,i}$  = taxa de saída do estado  $j$  para o estado  $i$ .

Ou seja, a frequência com que se encontra um estado é igual ao produto da probabilidade de estado estacionário pela taxa de saída deste estado. Assim, tem-se que a frequência de entrada num estado é sempre igual a frequência de saída deste mesmo estado.

### 4.3 - Modelagem das Falhas e das Manutenções

#### 4.3.1 - Modelagem das Falhas por Deterioração:

Quando se utilizam cadeias de Markov para representar o funcionamento de um equipamento elétrico, a representação mais comumente utilizada é mostrada no diagrama de Markov da Figura 4.1. Neste diagrama, considera-se que o equipamento pode estar em duas situações: funcionando ou falhado. Este modelo é chamado de modelo a dois estados: operação (estado no qual o equipamento está funcionando) e falha (estado no qual o equipamento não está funcionando, está falhado ou sendo reparado após uma falha).

Para mostrar a influência da manutenção preventiva no equipamento, o processo de falha devido ao envelhecimento não pode ser representado apenas pelo modelo a dois estados. O processo de falha devido ao envelhecimento (também chamado de deterioração ou desgaste total) é um processo lento e por isso a transição do estado de perfeito funcionamento do equipamento para o estado de falha devido ao desgaste não ocorre bruscamente, como no modelo a dois estados, mas pode ser representado através de vários estágios. Assim, os estados do equipamento são considerados como tendo uma forma de deterioração de Markov com  $(k+1)$  estados, onde  $k$  é o número de estados até a falha ocorrer. Os estados do equipamento consistem de estado bom (estado 1), estados degradados (estados 2, 3, ...,  $k$ ) e falhado (estado  $k+1$ , ou estado  $F_1$ ). Num processo Markoviano, a taxa de transição de um estado para o outro (incluindo o estado de falha) é igual em qualquer estado, sendo seu valor igual a  $k\lambda_1$ , que representa uma parcela  $k$  vezes menor da taxa de transição total. O modelo é mostrado na Figura 4.2 [10].

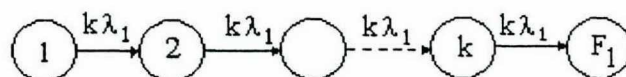


Figura 4.2 - Modelo de Markov para os vários estados sucessivos de deterioração do equipamento;  $k\lambda_1$  = taxa de saída de cada estágio de deterioração, onde  $k$  é o número de estágios;  $F_1$  = estado de falha por deterioração.

Definindo  $t_{i,i+1}$  como tempo de transição do estado  $i$  para o estado  $i+1$  ( $1, 2, \dots, k+1$ ). Então o tempo total para a falha por deterioração do equipamento (do estado 1 até o estado  $k+1$ ) será:

$$\tau_{k+1} = t_{1,2} + t_{2,3} + \dots + t_{k,k+1} \quad (4.8)$$

Logo, a função densidade de probabilidade do tempo para a falha por deterioração do equipamento será:

$$f(\tau_{k+1}) = f(t_{1,2} + t_{2,3} + \dots + t_{k,k+1}) \quad (4.9)$$

Como  $t_{1,2}, t_{2,3}, \dots, t_{k,k+1}$  são variáveis aleatórias independentes, a densidade da soma de  $t_{1,2} + t_{2,3} + \dots + t_{k,k+1}$  é dada pela convolução sucessiva das densidades de cada uma dessas variáveis. Utilizando as propriedades da transformada de Laplace, obtém-se:



$$\begin{aligned}
\mathcal{L}\{f(\tau_{k+1})\} &= \mathcal{L}\{f(t_{1,2} + t_{2,3} \dots + t_{k,k+1})\} \\
&= \mathcal{L}\{f(t_{1,2})\} \cdot \mathcal{L}\{f(t_{2,3})\} \cdot \dots \cdot \mathcal{L}\{f(t_{k,k+1})\}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Como a taxa de transição de um estado para o outro foi considerada idêntica em qualquer estado, então:

$$\mathcal{L}\{f(\tau_{k+1})\} = [\mathcal{L}\{f(t)\}]^k \tag{4.11}$$

Agora, se a função densidade de probabilidade para os tempos entre um estado e outro  $f(t_{i,i+1})$ , pode ser definida como uma função exponencial negativa com taxa de transição  $k\lambda_1$ :

$$f(t_{i,i+1}) = f(t) = k\lambda_1 \cdot \text{EXP}[-k\lambda_1 t] \tag{4.12}$$

Logo a transformada de Laplace de  $f(t)$  será:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = \frac{k\lambda_1}{s + k\lambda_1} \tag{4.13}$$

Substituindo este valor na equação 4.11 e através da transformada inversa desta expressão, obtém-se a função densidade de probabilidade do tempo para falha por desgaste total (deterioração):

$$f(\tau_{k+1}) = \frac{(k\lambda_1)^k \cdot t^{k-1} \cdot \text{EXP}[-k\lambda_1 t]}{(k-1)!} \tag{4.14}$$

Esta expressão é conhecida como densidade de probabilidade da distribuição Erlang. A distribuição Erlang é um caso especial da distribuição Gamma, amplamente utilizada em estudos de sistemas de potência. A definição da distribuição Gamma pode ser encontrada no Apêndice 1.

Após a falha devido ao desgaste total, o equipamento é restaurado através de uma reforma, e suas condições de operação são tão boas como as de um equipamento novo, no estado 1 de deterioração. A taxa de transição do estado de falha  $F_1$  para o estado 1 de deterioração é dada por  $\mu_1$ , taxa de reparo após a falha por desgaste total. Assim, a modelagem para as falhas por desgaste é mostrado na Figura 4.3.



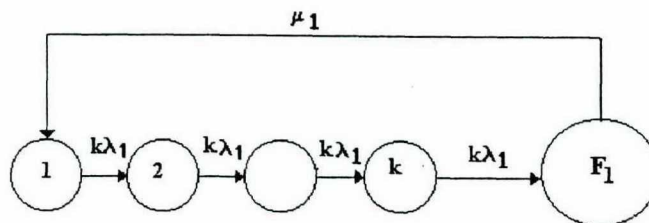


Figura 4.3 - Diagrama de Markov (sem manutenções preventivas) para o modelo para as falhas por deterioração;  $k\lambda_1$  = taxa de saída de cada estágio de deterioração, onde  $k$  é o número de estágios;  $\mu_1$  = taxa de reparo após a falha por deterioração  $F_1$ .

Neste estudo,  $k$  é um número inteiro e positivo e representa o número de estados até a falha por desgaste total ocorrer. Nestes estados intermediários, o equipamento está sofrendo algum tipo de desgaste, mas ainda está em funcionamento. Nos modelos adotados, a manutenção preventiva, por definição, melhora as condições do equipamento para um estado de deterioração anterior ao que se encontrava antes de ser feita a manutenção (ver item 4.3.3). Assim, a proporção de deterioração, ou quanto do desgaste do equipamento pode ser eliminado através de atividades simples de manutenção (ajustes, lubrificação, troca de alguns componentes mais frágeis, de baixo custo e acentuado desgaste) determina a quantidade de estados.

Um alto valor para  $k$  indica que pouca ou nenhuma melhora é realizada no equipamento através da manutenção preventiva. Porém, valores menores do que 3 também foram descartados, pois foram considerados irrealistas [13]. Por exemplo, em um estudo para máquinas elétricas rotativas [24], foram identificados 4 estados para a isolação elétrica, com razoável precisão:

- 1) isolação nova e perfeita;
- 2) isolação com deterioração mínima;
- 3) deterioração significativa;
- 4) falha na isolação.

Assim, neste trabalho, adotou-se um valor para  $k$  igual a 3 para a maioria das simulações computacionais, considerando que as principais falhas em equipamentos de sistemas de potência ocorrem devido a falhas na isolação elétrica.

#### 4.3.2 - Modelagem da Manutenção Preventiva:

A modelagem da manutenção preventiva de equipamentos através de cadeias de Markov considera os estados de manutenção preventiva como estados em que o equipamento foi retirado de operação para a realização de testes, ensaios, lubrificação, ajustes ou troca de alguns componentes. A taxa de transição (ou taxa de saída) dos estados de operação para os estados de manutenção preventiva, é igual em qualquer estado, não importando o grau de deterioração do equipamento neste estado. A manutenção preventiva é modelada por um processo de Poisson, com parâmetro  $\lambda_m$  (taxa de saída para o estado de manutenção preventiva) resultando em tempos para a manutenção exponencialmente distribuídos.

Neste modelo, a ação da manutenção preventiva melhora a condição do equipamento e eleva os índices de confiabilidade, mas não para valores tão bons como os de um equipamento novo. Após a manutenção preventiva, o equipamento retorna à operação num estado de degradação menor ao que se encontrava antes de se fazer a manutenção, como mostrado na Figura 4.4.

A desvantagem desta modelagem é que a distribuição exponencial não é adequada para modelar os tempos para a manutenção preventiva pois é muito diferente da realidade. Para contornar este problema, a transição do estado de operação para o estado de manutenção foi dividida em estágios [12]. Na Figura 4.5, tem-se o diagrama de Markov para este modelo de manutenção preventiva, onde  $r$  é o número de estágios até o estado de manutenção. Os tempos para a transição entre um estágio e outro são exponencialmente distribuídos. Assim, o tempo para a transição do estado de operação até a manutenção preventiva possui uma distribuição Erlang.

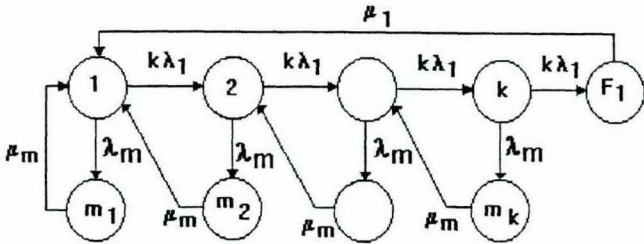


Figura 4.4 - Diagrama de Markov onde  $m_i$  são os estados de Manutenção Preventiva do equipamento,  $\lambda_m$  é a taxa de saída para a manutenção e  $\mu_m$  é a taxa de retorno para o estado de operação.

Como foi mostrado no item 4.3.1, para uma cadeia de Markov de  $(r+1)$  estados com tempos distribuídos exponencialmente entre um estado e outro, os tempos de transição entre o estado 1 e o estado  $(r+1)$  ou estado de manutenção preventiva, possuem uma distribuição Erlang com parâmetros  $r > 0$ , inteiro e  $\lambda_m > 0$ .

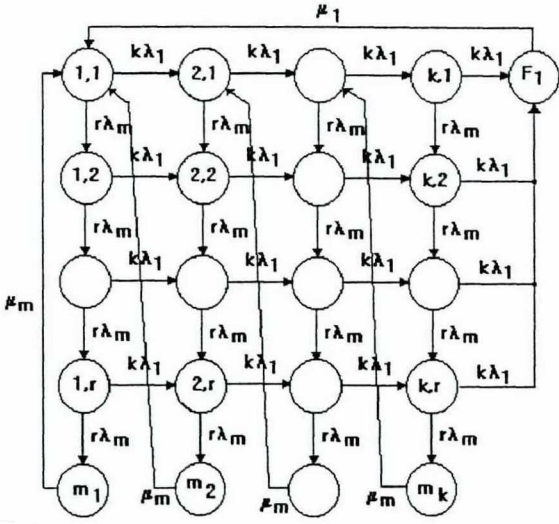


Figura 4.5 - Diagrama de Markov com Manutenção Preventiva efetuada em  $r$  estágios -  $r\lambda_m$  é a taxa de manutenção,  $r$  é o número de estágios até a manutenção;  $\mu_m$  é a taxa de retorno para o estado de operação.

Uma das propriedades da distribuição Erlang é que sua curva aproxima-se da Log-normal com o aumento de  $r$  (ver Apêndice 1). Assim, pode-se ter uma faixa cada vez mais estreita em



torno do valor de tempo médio para manutenção ( $1/\lambda_m$ ) e este valor pode se tornar determinístico quando  $r \rightarrow \infty$ . Porém, se a intenção é encontrar valores próximos dos valores determinísticos, não é necessário escolher um alto valor para  $r$ . De fato, pode-se ter valores bem próximos da média  $\lambda_m$  com um valor de  $r$  igual a 3. Por esta razão, neste trabalho o valor adotado para o número de estágios até a manutenção preventiva foi igual a 3.

#### 4.3.3 - Modelagem das Falhas Aleatórias:

Além de considerar as falhas devido ao processo de degradação natural do equipamento em operação, os modelos adotados também representam as falhas aleatórias que podem ocorrer no equipamento. As falhas aleatórias são causadas por agentes externos e independentes do tempo de funcionamento, tais como tempestades, raios, ventos, acidentes e sobrecargas. Estas falhas são representadas no diagrama de Markov como estados nos quais o equipamento está fora de operação. A reparação após a falha aleatória, pode ser feita através de uma reforma, ou através de um reparo mínimo. Quando o procedimento da reforma é adotado [12], os índices de confiabilidade do equipamento após a restauração são considerados iguais aos de um equipamento em sua condição inicial. Como pode ser visto no diagrama de Markov da Figura 4.6, após a reforma, o equipamento retorna ao estado 1 de funcionamento, ou seja, suas condições de operação são tão boas quanto as de um equipamento novo. A taxa de falha ou taxa de saída para o estado de falha  $F_0$  é dada por  $\lambda_0$ , e  $\mu_0$  é a taxa de reparo após a falha aleatória.

Deve-se, contudo, observar que esta modelagem faz considerações muito otimistas em relação aos índices de confiabilidade do equipamento, quando este sofre uma falha e é restaurado. Na ocorrência de uma falha em equipamentos de sistemas de potência complexos, que possuem um considerável número de componentes, a substituição sempre é um recurso dispendioso e a reforma é muito demorada para uma situação emergencial.



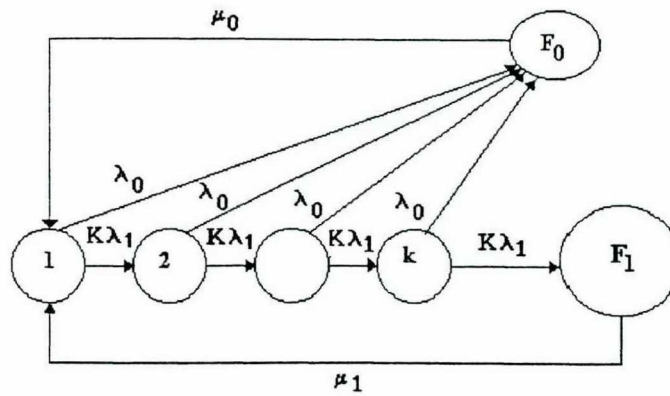


Figura 4.6 - Diagrama de Markov para o modelo de reforma total após falha aleatória.

Para realizar uma reforma capaz de retornar o equipamento para um estado de operação tão bom quanto um novo, além da troca de componentes, devem ser realizados testes e ensaios, que muitas vezes não podem ser feitos no próprio local de operação do equipamento. Isto porque a simples troca de um ou mais componentes falhados, não é capaz de elevar os índices de confiabilidade do equipamento aos níveis iniciais, uma vez que os componentes não-falhados continuam com o mesmo tempo de envelhecimento. Por estes motivos, para vários equipamentos como transformadores e disjuntores, este modelo de restauração não é realístico.

No caso de ser realizado um reparo mínimo após a falha aleatória, o equipamento retorna ao estado de deterioração em que se encontrava imediatamente anterior à falha (conforme definido no Capítulo 3), como mostra o diagrama de Markov da Figura 4.7 [1]. Esta consideração se aproxima mais da realidade, uma vez que saídas não-programadas possuem uma característica emergencial mais adequada ao reparo mínimo, que geralmente é mais rápido do que uma reforma total. Neste caso, a confiabilidade do equipamento é essencialmente igual ao valor anterior à falha aleatória.

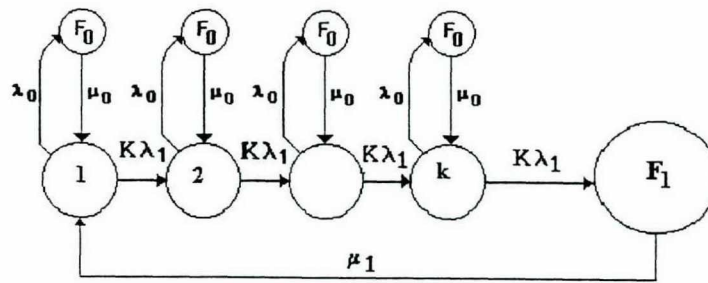


Figura 4.7 - Diagrama de Markov para o modelo de reparo mínimo após a falha aleatória.

#### 4.4 - Modelos de Markov adotados neste Trabalho

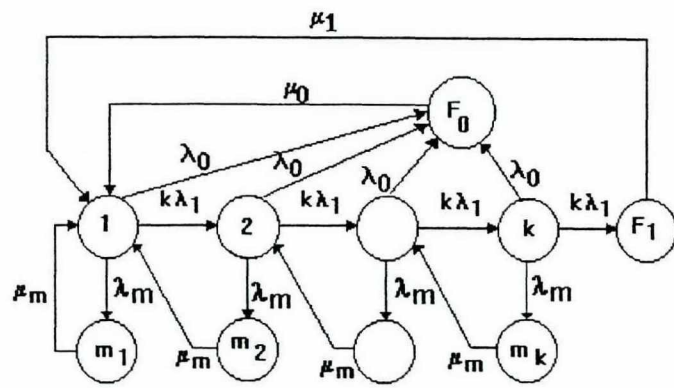
Neste trabalho foram adotados quatro modelos de Markov, com pequenas diferenças entre si, quanto à transição da operação para o estado de manutenção preventiva e quanto à forma de restauração após as falhas aleatórias. Todos estes modelos de Markov foram implementados computacionalmente com o objetivo de encontrar o OTTM-*Optimal Time to Maintenance* (tempo ótimo para manutenção preventiva), calculado a partir da maximização da disponibilidade do equipamento. Neste caso, entende-se por disponibilidade (A) a soma das probabilidades dos estados em que o equipamento está funcionando, ainda que com algum processo de deterioração. Estes modelos são mostrados a seguir:

##### 4.4.1 - Modelo 1:

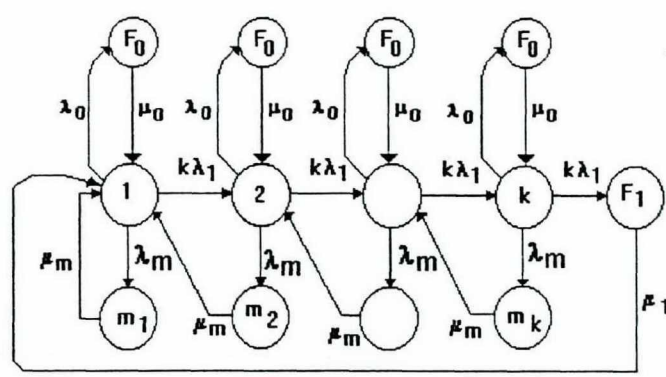
Inicialmente foi adotada a modelagem simplificada para manutenção preventiva, mostrada na Figura 4.4. Nesta modelagem a transição do estado de operação para o estado de manutenção preventiva é feita através de um único estágio, ou seja,  $r=1$ . As falhas aleatórias agregadas a este primeiro modelo, são restauradas através da reforma total, e podem ser visualizadas no diagrama de Markov da Figura 4.8a [1].

4.4.2 - Modelo 2:

Como o reparo mínimo foi considerado mais realista para equipamentos elétricos de sistemas de potência, um segundo modelo foi adotado (Modelo 2), considerando o reparo mínimo após as falhas aleatórias, e o número de estágios de transição do estado operativo para o estado de manutenção preventiva  $r=1$ . A Figura 4.8b mostra o diagrama de Markov para o Modelo 2.



(a)



(b)

Figura 4.8 - Manutenção Preventiva Simplificada ( $r=1$ ):  
a) Com reforma total após falhas aleatórias - Modelo 1;  
b) Com reparo mínimo após falhas aleatórias - Modelo 2.

#### 4.4.3 - Modelo 3:

No Modelo 3, a transição do estado operativo para o estado de manutenção preventiva foi dividida em estágios, como mostrado na Figura 4.5. Assim, os tempos para manutenção preventiva passam a ter uma distribuição Erlang. Neste modelo também foi considerado o reparo mínimo após as falhas aleatórias, pois este tipo de reparo demonstrou ser o mais adequado para representar uma situação real de falha. O valor adotado para  $r$  ( número de estágios até a manutenção preventiva) foi 3 e o valor adotado para  $k$  ( número de estágios até a falha por desgaste total) também foi igual a 3, embora nas simulações seja possível utilizar outros valores.

Para calcular a disponibilidade, é necessário calcular a probabilidade de cada estado dos modelos de Markov. Como mostrado no item 4.2, as probabilidades do estado estacionário podem ser calculadas por um conjunto de equações lineares (equação 4.5), ou pelo método da frequência e duração (equação 4.7).

É mostrado a seguir o conjunto de equações de estado estacionário para o Modelo 3:

$$P(1,1).(k\lambda_1 + r\lambda_m + \lambda_0) = \mu_0 P_{Fo}(1,1) + \mu_1 P_{F1} + \mu_m P(1,r+1) + \mu_m P(2,r+1) \quad (4.15)$$

$$P(i,1).(k\lambda_1 + r\lambda_m + \lambda_0) = \mu_0 P_{Fo}(i,1) + k\lambda_1 P(i-1,1) + \mu_m P(i+1,r+1) \quad 2 \leq i < k \quad (4.16)$$

$$P(k,1).(k\lambda_1 + r\lambda_m + \lambda_0) = \mu_0 P_{Fo}(k,1) + k\lambda_1 P(k-1,1) \quad (4.17)$$

$$P(1,j).(k\lambda_1 + r\lambda_m + \lambda_0) = \mu_0 P_{Fo}(1,j) + r\lambda_m P(1,j-1), \quad 2 \leq j < r \quad (4.18)$$

$$P(i,j).(k\lambda_1 + r\lambda_m + \lambda_0) = \mu_0 P_{Fo}(i,j) + r\lambda_m P(i,j-1) + k\lambda_1 P(i-1,j) \quad 2 \leq i \leq k, \quad 2 \leq j \leq r \quad (4.19)$$

$$\mu_m P(i,r+1) = r\lambda_m P(i,r) \quad (4.20)$$

$$\mu_0 P_{Fo}(i,j) = \lambda_0 P(i,j) \quad (4.21)$$



$$\mu_1 P_{F1} = k\lambda_1 \sum_{j=1}^r P(k,j) \quad (4.22)$$

$$P_{F1} + \sum_{i=1}^k P(i,r+1) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r P_{F0}(i,j) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r P(i,j) = 1 \quad (4.23)$$

Onde:  $P(i,j)$  = probabilidade do estado  $(i,j)$  onde  $i$  é o estágio de deterioração ( $i = 1,2,...,k$ ) e  $j$  é o estágio para a manutenção ( $j = 1,2,...,r$ );

$P_{F0}(i,j)$  = probabilidade de falha aleatória do estado  $(i,j)$ ;

$P_{F1}$  = probabilidade de falha por deterioração (ou desgaste total);

$P(i,r+1)$  = probabilidade do equipamento estar em manutenção, onde  $i$  é o estágio de deterioração ( $i = 1,2,...,k$ );

$r\lambda_m$  = taxa de saída para os estados de manutenção,  $r$  é o número de estágios até a manutenção;

$\mu_m$  = taxa de transição para o estado de operação;

$k\lambda_1$  = taxa de saída de cada estágio de deterioração, onde  $k$  é o número de estágios;

$\mu_1$  = taxa de reparo após a falha por deterioração  $F_1$ ;

$\lambda_0$  = taxa de falha ou taxa de saída para o estado de falha  $F_0$

$\mu_0$  = taxa de reparo após a falha aleatória.

#### 4.4.4 - Modelo 4:

Em alguns equipamentos de sistemas de potência, na ocorrência de uma falha de causa aleatória, são adotados dois procedimentos em conjunto. É realizado o reparo mínimo para restabelecer o funcionamento do equipamento, e juntamente com este reparo mínimo são realizados pequenos ajustes e lubrificações, aproveitando-se do fato do equipamento já encontrar-se fora de operação. Estes pequenos ajustes não melhoram as condições do equipamento, mas diminuem a necessidade da manutenção preventiva, e a contagem de tempo para a próxima

manutenção preventiva é reiniciada. Com este procedimento, há um decréscimo no número de saídas programadas do equipamento e um ganho na disponibilidade.

O Modelo 4 considera o reparo mínimo após as falhas aleatórias como descrito acima. A transição para o estado de manutenção preventiva é dividida em  $r=3$  estágios, assim como no Modelo 3. As equações de balanço de frequências para este modelo são mostradas a seguir:

$$P(1,1).(k\lambda_1 + r\lambda_m + \lambda_0) = \mu_0 \sum_{j=1}^r P_{Fo}(1,j) + \mu_1 P_{FI} + \mu_m P(1,r+1) + \mu_m P(2,r+1) \quad (4.24)$$

$$P(i,1).(k\lambda_1 + r\lambda_m + \lambda_0) = \mu_0 \sum_{j=1}^r P_{Fo}(i,j) + k\lambda_1 P(i-1,1) + \mu_m P(i+1,r+1) \quad 2 \leq i < k \quad (4.25)$$

$$P(k,1).(k\lambda_1 + r\lambda_m + \lambda_0) = \mu_0 \sum_{j=1}^r P_{Fo}(1,j) + k\lambda_1 P(k-1,1) \quad (4.26)$$

$$P(1,j).(k\lambda_1 + r\lambda_m + \lambda_0) = r\lambda_m P(1,j-1), \quad 2 \leq j < r \quad (4.27)$$

$$P(i,j).(k\lambda_1 + r\lambda_m + \lambda_0) = r\lambda_m P(i,j-1) + k\lambda_1 P(i-1,j) \quad 2 \leq i \leq k, 2 \leq j \leq r \quad (4.28)$$

$$\mu_m P(i, r+1) = r\lambda_m P(i,r) \quad (4.29)$$

$$\mu_0 P_{Fo}(i, j) = \lambda_0 P(i,j) \quad (4.30)$$

$$\mu_1 P_{FI} = k\lambda_1 \sum_{j=1}^r P(k,j) \quad (4.31)$$

$$P_{FI} + \sum_{i=1}^k P(i,r+1) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r P_{Fo}(i,j) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r P(i,j) = 1 \quad (4.32)$$

Comparando-se as equações 4.15, 4.16 e 4.17 respectivamente com as equações 4.24, 4.25 e 4.26, observa-se que foi modificada a expressão da frequência dos estados  $P(1,1)$ ,  $P(1,2)$ ...  $P(1,k)$ , incorporando o produto da taxa de reparo aleatória pelo somatório das probabilidades de falha aleatória. Com esta mudança, a probabilidade destes estados torna-se numericamente maior.

Como são estados de operação do equipamento, ocorre um acréscimo na disponibilidade do mesmo.

Deve-se ressaltar que em todos os modelos adotados, considera-se que as falhas aleatórias e as falhas por desgaste ocorrem somente durante a operação do equipamento, não podendo ocorrer enquanto está sendo feita a manutenção no equipamento.

#### 4.5 - Algoritmo para o Cálculo do Intervalo entre as Manutenções Preventivas

Os modelos de Markov mostrados no item 4.4 foram implementados sob a forma de um algoritmo, e foram realizadas várias simulações com o objetivo de analisar a influência do desgaste e das falhas aleatórias no comportamento do OTTM.

A estrutura do algoritmo é simples, podendo ser vista na Figura 4.9. A busca do OTTM é feita através de uma varredura em todos os valores possíveis para os intervalos de manutenção preventiva durante a vida útil do equipamento. O valor do OTTM é obtido através da maximização da disponibilidade ( $A$ ), ou seja o  $1/\lambda_m^*$  é o valor para o qual se tem a máxima utilização do equipamento. Este algoritmo foi utilizado em todos os modelos implementados, e os resultados obtidos são mostrados no capítulo 5.

O algoritmo foi implementado em linguagem FORTRAN. Apesar da sua estrutura se basear numa varredura sobre a curva da disponibilidade  $A$ , o tempo computacional gasto para se encontrar o seu valor máximo de  $A$  é pequeno, da ordem de 1 a 3 segundos para simulações em um computador 486 ou 386 com co-processador.

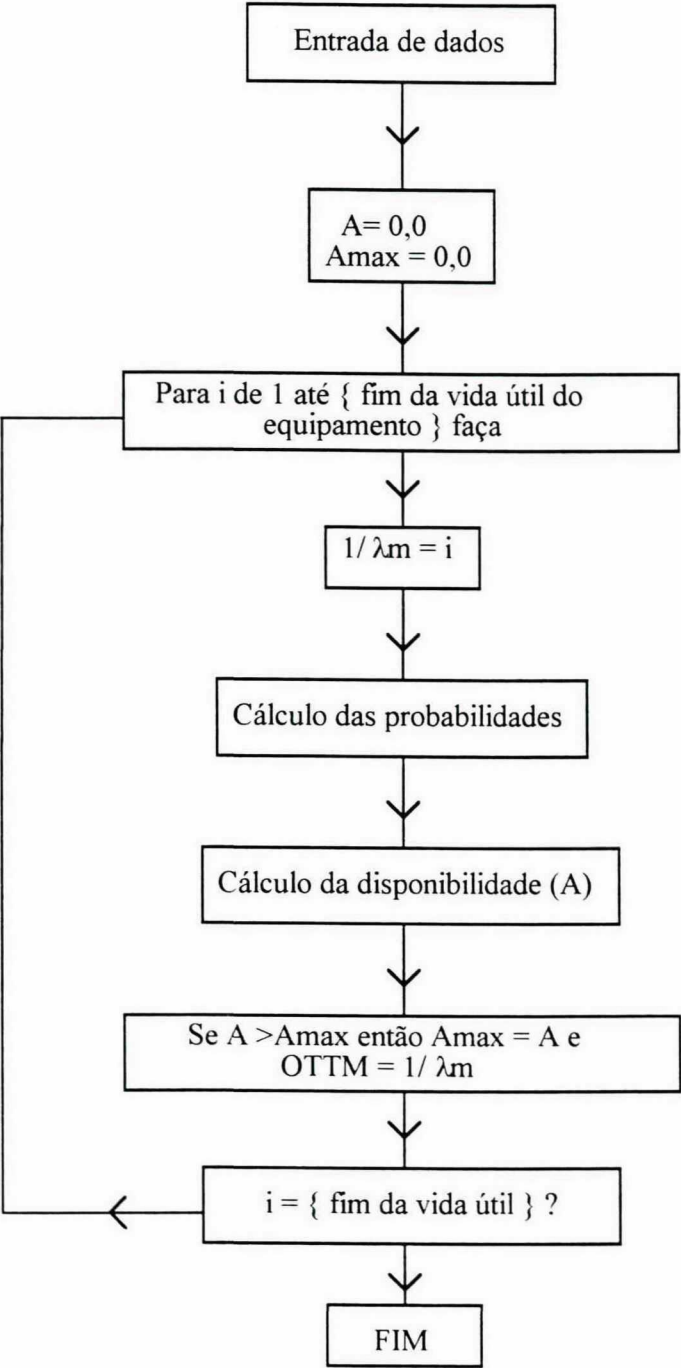


Figura 4.9 - Algoritmo para cálculo do OTTM - *Optimal Time to Maintenance* ( Tempo Ótimo para Manutenção Preventiva)



## Capítulo V

### 5. Análise do Comportamento do OTTM

#### 5.1 - Introdução.

Neste capítulo são apresentados alguns dos resultados obtidos nas simulações computacionais para o cálculo do OTTM (tempo ótimo para manutenção preventiva) de equipamentos elétricos de potência. São analisadas separadamente, a influência do desgaste e a influência das falhas aleatórias tanto no comportamento do OTTM quanto nas indisponibilidades mínimas encontradas.

É apresentada uma aplicação para o Modelo 4, no qual o reparo mínimo após a falha aleatória é acompanhado de algumas atividades de manutenção preventiva, com o objetivo de aumentar a disponibilidade do equipamento, reduzir o número das saídas programadas. Este modelo foi utilizado para avaliar o desempenho e os custos da manutenção preventiva em relés de distância eletromecânicos.

#### 5.2 - Análise do Comportamento do OTTM

##### 5.2.1 - Análise Comparativa entre o Modelo 1 e o Modelo 2:

Para o cálculo do intervalo ótimo entre as manutenções preventivas mínimas, inicialmente foram implementados os modelos Markovianos simplificados, nos quais a transição do estado operativo para o estado de manutenção preventiva é realizada através de um único estágio ( $r=1$ , como mostrado na Figura 4.4), e o tempo para esta transição possui distribuição exponencial. Foram implementados dois modelos, diferenciados pelo modo pelo qual o equipamento retorna à operação após a falha aleatória: através de uma reforma (Modelo 1, representado na Figura 4.8a).

ou através de um reparo mínimo (Modelo 2, mostrado na Figura 4.8b). Foram realizadas simulações e os resultados obtidos foram comparados com os resultados apresentados nas referências [1, 12], comprovando assim a validade do algoritmo implementado.

Para o cálculo do OTTM e das indisponibilidades mínimas ( $U^*$ ), são necessários os seguintes dados: tempo médio para falha aleatória ( $1/\lambda_0$ ), duração do reparo mínimo/reforma após a falha aleatória ( $1/\mu_0$ ), tempo médio para falha devido ao desgaste do equipamento ( $1/\lambda_1$ ), duração da reforma total após o desgaste ( $1/\mu_1$ ) e duração da manutenção preventiva ( $1/\mu_m$ ). Por tempo para falha por desgaste considera-se a vida útil total esperada do equipamento, caso não ocorresse nenhuma manutenção preventiva no equipamento. O tempo médio para falha aleatória é o tempo médio de ocorrências de falhas aleatórias, ou seja, falhas causadas por acidentes, ventos tempestades, raios, sobrecargas, etc. A Tabela 5.1 apresenta alguns resultados obtidos para o Modelo 1 e Modelo 2, com a variação de  $1/\lambda_0$  e  $1/\mu_0$ , considerando tempo médio para falha devido ao desgaste do equipamento  $1/\lambda_1=1000$  dias, duração da reforma total após o desgaste  $1/\mu_1=14$  dias e duração da manutenção preventiva  $1/\mu_m=0,5$  dia.

Tabela 5.1 - Influência da falha aleatória no OTTM e nas Indisponibilidades Mínimas para os modelos 1 e 2.

Variação do tempo para falha aleatória e da duração do reparo		Reforma (Modelo 1)		Reparo mínimo (Modelo 2)	
$1/\lambda_0$ (dias)	$1/\mu_0$ (dias)	OTTM (dias)	Indisponib. Mínima	OTTM (dias)	Indisponib. Mínima
500	3,5	203	0,012392	136	0,013513
1000	3,5	163	0,009531	136	0,010091
$10^8$	3,5	136	0,006654	136	0,006654
500	14	203	0,032459	136	0,033533
1000	14	163	0,019726	136	0,020276
$10^8$	14	136	0,006654	136	0,006654

Na Tabela 5.1, é possível fazer uma comparação entre os modelos 1 e 2, e observar a influência da reforma ou do reparo mínimo após a falha aleatória, no comportamento do OTTM. Em situações nas quais existe uma predominância das falhas aleatórias, o OTTM encontrado para o Modelo 1 é sempre maior do que o OTTM encontrado para o Modelo 2. Este comportamento do OTTM em relação à frequência de falhas aleatórias, é facilmente explicado para o Modelo 1 pois, se o equipamento é revisado sempre que ocorre uma falha aleatória, a necessidade de manutenções preventivas torna-se menor, uma vez que as condições do equipamento se renovam a cada ocorrência destas falhas. No caso do Modelo 2, no qual o reparo mínimo após a falha aleatória não acrescenta melhorias nas condições operativas do equipamento, o valor do OTTM permanece o mesmo, independente da frequência de falhas aleatórias. Se as falhas aleatórias tornam-se raras ( $1/\lambda_0=10^8$  dias), os valores encontrados para o OTTM são iguais em ambos os modelos. As indisponibilidades mínimas também podem ser observadas na Tabela 5.1.

A indisponibilidade do equipamento é a soma das probabilidades do equipamento estar falhado com as probabilidades do equipamento estar em manutenção preventiva. Em termos analíticos, a indisponibilidade  $U$  para o modelo de Markov simplificado, pode ser calculada por:

$$U = \sum_{i=1}^k P_{F0}(i,1) + P_{F1} + \sum_{i=1}^k P(i,2) \quad (5.1)$$

Onde:  $P(i,j)$  = Probabilidade do estado  $(i,j)$ , onde  $i$  é o estágio de deterioração ( $i = 1, \dots, k$ ) e  $j$  define o estado de operação ( $j = 1$ ), ou estado de manutenção preventiva do equipamento ( $j = 2$ );

$P_{F0}(i,j)$  = Probabilidade de falha aleatória do estado  $P(i,j)$ ;

$P_{F1}$  = Probabilidade de falha por deterioração (ou desgaste total).

Desta forma, as indisponibilidades mínimas de ambos modelos decrescem se a probabilidade de falhas aleatórias diminui, e tornam-se iguais quando não há falhas aleatórias.

Comparando-se os modelos de reforma e reparo mínimo após a falha aleatória, as indisponibilidades mínimas no Modelo 1 foram menores do que no Modelo 2. Isto poderia indicar



que o modelo de reforma completa após falha aleatória é sempre preferível ao modelo de reparo mínimo, pois o OTTM é maior e a indisponibilidade menor. Porém, deve-se considerar que os tempos para reforma/reparo mínimo ( $1/\mu_0$ ) são considerados iguais em cada linha da Tabela 5.1. Pela definição de reforma e reparo mínimo é adequado supor que a reforma dispense mais tempo do que um reparo mínimo, além de ter um custo maior. Assim, para analisar corretamente a influência na indisponibilidade do reparo mínimo e da reforma após as falhas aleatórias, deve-se comparar simulações com diferentes valores para  $1/\mu_0$ , sendo que a duração da reforma será sempre maior do que a duração do reparo mínimo para um mesmo equipamento. Na Tabela 5.2, tem-se como exemplo, uma comparação dos valores dos OTTM e das indisponibilidades mínimas para um equipamento no qual a duração da reforma completa é o dobro da duração do reparo mínimo. Nestas condições, a indisponibilidade mínima será maior para o Modelo 1, como já era esperado.

Tabela 5.2 -Comparação das Indisponibilidades Mínimas para os modelos 1 e 2, considerando a duração da reforma após falha aleatória igual ao dobro da duração do reparo mínimo.

	$1/\lambda_0$ (dias)	$1/\lambda_1$ (dias)	$1/\mu_0$ (dias)	$1/\mu_1$ (dias)	$1/\mu_m$ (dias)	OTTM (dias)	Indisponib. Mínima
Modelo 1	500	1000	14	14	0,5	203	0,032459
Modelo 2	500	1000	7	14	0,5	136	0,020276

A Tabela 5.3 apresenta o comportamento do OTTM e das Indisponibilidades Mínimas, para os modelos 1 e 2, quando o tempo médio para falha por desgaste ( $1/\lambda_1$ ) sofre uma variação.

O valor do tempo para falha aleatória adotado foi elevado ( $1/\lambda_0=10^8$  dias), com o objetivo de avaliar apenas a influência do desgaste (ou deterioração) no equipamento para os modelos 1 e 2. Além disso, considerou-se duração do reforma/reparo mínimo após a falha aleatória  $1/\mu_0=7$  dias, a duração da reforma total após o desgaste  $1/\mu_1=14$  dias e duração da manutenção preventiva  $1/\mu_m= 0,5$  dia.



Tabela 5.3 - Influência do desgaste no OTTM e nas Indisponibilidades Mínimas para os modelos 1 e 2.

<i>Tempo para falha por desgaste</i>	<i>Reforma (Modelo 1)</i>		<i>Reparo mínimo (Modelo 2)</i>	
$1/\lambda_1$ (dias)	OTTM (dias)	Indisponibilidade Mínima	OTTM (dias)	Indisponibilidade Mínima
1000	136	0,006654	136	0,006654
2000	272	0,003337	271	0,003337
3000	411	0,002227	408	0,002227
4000	543	0,001671	540	0,001672
5000	682	0,001401	680	0,001407

Dos valores obtidos para o OTTM, com o aumento do tempo médio para falhas por desgaste ( $1/\lambda_1$ ), observa-se que, se não há variação de nenhuma outra taxa, o incremento no tempo para falha por desgaste total ocasiona um incremento proporcional no intervalo ótimo entre as manutenções preventivas.

Esta característica do modelo de Markov para a manutenção preventiva mínima é útil para demonstrar a importância do valor da taxa de falha por desgaste (ou taxa de deterioração), quando se deseja obter uma periodicidade para as manutenções preventivas. Quanto menor for a taxa de deterioração do equipamento, menor a necessidade de saídas programadas, como as manutenções preventivas. Porém, se o valor da taxa de deterioração não refletir adequadamente o desgaste no equipamento, os resultados podem indicar uma frequência de inspeções preventivas maior do que realmente seria necessário (acarretando prejuízo com custos desnecessários e diminuição da disponibilidade), ou indicar uma frequência de manutenções preventivas menor (gerando uma política de manutenções preventivas ineficiente, incapaz de reduzir a processo de deterioração do equipamento).

Se o valor do OTTM é diretamente proporcional ao tempo para falha por desgaste, é necessário analisar também a influência da duração da reforma após uma falha por desgaste total

( $1/\mu_1$ ). A Figura 5.1 apresenta o comportamento do OTTM com a variação de  $1/\mu_1$ . Os valores das outras taxas são apresentados na Tabela 5.4. Novamente considerou-se que  $1/\lambda_0 \rightarrow \infty$ , assumindo um valor para o tempo para as falhas aleatórias nas simulações igual a  $10^8$  dias. Assim, a influência das falhas aleatórias é eliminada neste casos, e o comportamento do OTTM em relação à  $1/\mu_1$  pode ser analisado para os modelos 1 e 2.

Tabela 5.4 - Dados adotados para as simulações nos modelos 1 e 2.

$1/\lambda_0$ (dias)	$1/\lambda_1$ (dias)	$1/\mu_0$ (dias)	$1/\mu_m$ (dias)	$1/\mu_1$ (dias)
10E8	1000	7	0,5	4 a 23

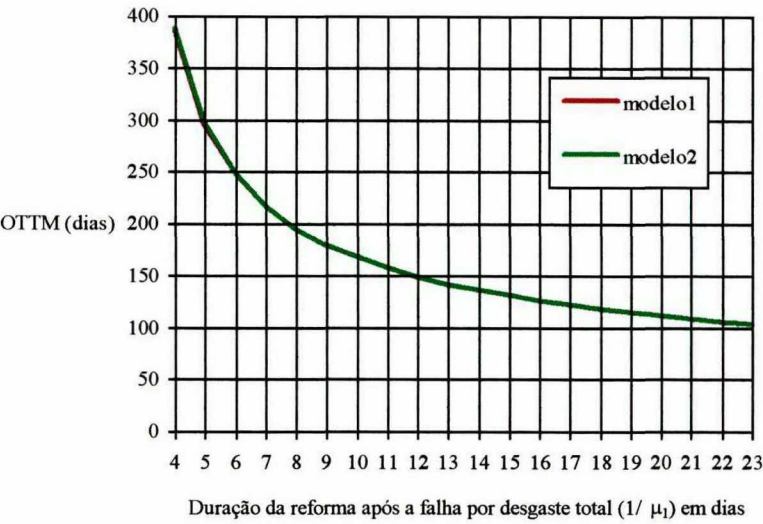


Figura 5.1 - Influência da variação de  $1/\mu_1$  no Intervalo ótimo entre as manutenções preventivas (OTTM) para os modelos 1 e 2 ( As duas curvas estão sobrepostas).

A cada acréscimo no tempo gasto para executar uma reforma geral no equipamento, após uma falha por desgaste, o valor do OTTM encontrado nas simulações diminui. Este comportamento do OTTM é justificado como [14]:

*O tempo médio ótimo para a manutenção mínima decresce quando o tempo médio de reparo para falha por deterioração cresce, indicando uma necessidade maior para as manutenções preventivas, se as durações dos reparos devido à deterioração tornam-se maiores.*

Como mostrado na Figura 5.1, o comportamento do OTTM em relação à duração da reforma após o desgaste total é semelhante para ambos os modelos, especialmente quando não há influência de falhas aleatórias.

As simulações apresentadas para o Modelo 1 e Modelo 2 têm por objetivo analisar a influência das falhas de causas aleatórias e a influência do desgaste no comportamento do OTTM. Estas análises podem ser estendidas para o Modelo 3, que será analisado a seguir.

#### 5.2.2 - Modelo 3 - Análise do Parâmetro $r$ :

O Modelo 3 é o modelo Markoviano estendido com número de estágios até a manutenção preventiva  $r > 1$  (Figura 4.5). As equações do Modelo 3 foram apresentadas no item 4.4. Neste modelo, considerou-se que o número de estágios para a manutenção preventiva  $r=3$  e o reparo mínimo como forma de restauração do equipamento após a falha aleatória, por motivos que serão explicados no item 5.2.3.

No Modelo 3, a transição para os estados de manutenção preventiva é feita através de estágios resultando em tempos para a manutenção preventiva que possuem uma distribuição Erlang. O valor destes tempos para manutenção tendem a se aproximar do valor médio com o aumento do parâmetro Erlang  $r$ .

A Figura 5.2 mostra o comportamento do OTTM com a variação do parâmetro  $r$ . Os valores assumidos para as taxas nestas simulações são mostrados na Tabela 5.4.



Tabela 5.5 - Valores das taxas adotados para as simulações, com variação do número de estágios para a manutenção preventiva (r).

	$1/\lambda_0$ (dias)	$1/\lambda_1$ (dias)	$1/\mu_0$ (dias)	$1/\mu_1$ (dias)	$1/\mu_m$ (dias)	r - número de estágios
● 1	500	1000	7	14	1	1 a 10
● 2	500	1000	7	14	0,5	1 a 10

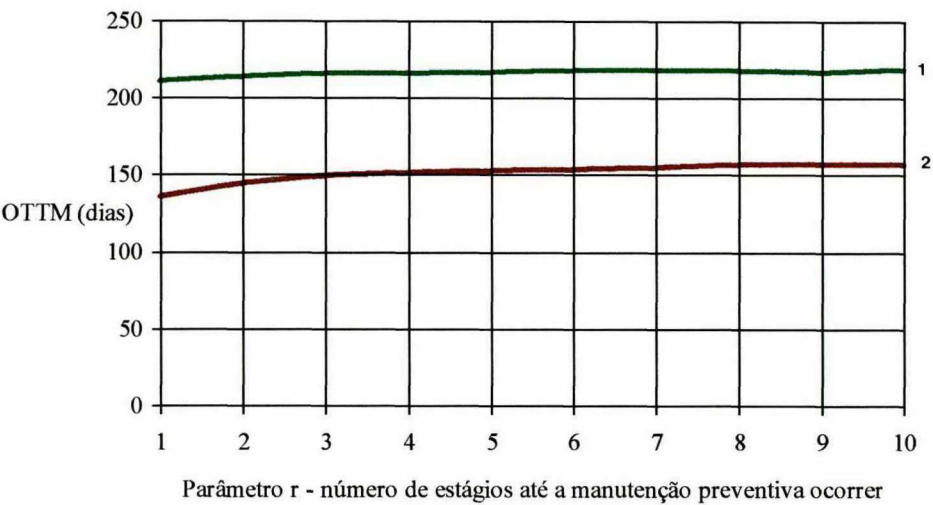


Figura 5.2 - Comportamento do OTTM com a variação do parâmetro r.

Na Figura 5.2, pode-se observar que com o acréscimo do parâmetro r, os valores encontrados para o OTTM se aproximam de um valor médio. Nas simulações com  $1/\mu_m=0,5$ dias, o valor do OTTM foi 150 dias para um valor de  $r=3$ , e 157 dias para um valor de  $r=10$ . Para as simulações com  $1/\mu_m=1$ dia, a variação do OTTM foi ainda menor pois, o valor do OTTM encontrado foi 213 dias para um valor de  $r=3$ , e 219 dias para um valor de  $r=10$ . Assim, com  $r=3$ , pode-se ter uma boa aproximação do valor médio determinístico (quando  $r \rightarrow \infty$ ), como mostrado pela diferença entre os valores obtidos para  $r=3$  e  $r=10$ .

Se as falhas por deterioração predominam sobre as falhas aleatórias, isto é, quando ocorrem mais falhas por deterioração ou desgaste do que falhas aleatórias, o modelo simplificado



(com  $r=1$ ) pode ser apropriado [12]. Se as falhas aleatórias ocorrem mais freqüentemente do que as falhas por deterioração, o valor de  $r$  passa a ter grande importância, sendo necessário o uso do modelo estendido ( $r>1$ ).

### 5.2.3 - Modelo 3 - Influência da Duração da Manutenção Preventiva e do Tempo para as Falhas Aleatórias:

O modelo de reparo mínimo após a falha aleatória apresenta-se mais adequado para representar equipamentos elétricos de sistemas de potência, pois mesmo quando o equipamento possui um substituto para o caso de uma falha (unidade stand-by), retirando-se assim o caráter emergencial da restauração após a falha, a reforma completa (capaz de restaurar o equipamento de modo que este volte a ser tão confiável quanto um equipamento novo) é muito dispendiosa e nem sempre possível numa situação real. Assim, no Modelo 3, considera-se que o equipamento é restaurado através de reparos mínimos quando ocorrem falhas aleatórias. O modelo estendido considerando a reforma após as falhas aleatórias não foi analisado.

Para simular o funcionamento de equipamentos elétricos, o número de estágios até o estado de manutenção preventiva adotado no Modelo 3 foi  $r=3$ , a fim de se comparar os diferentes resultados obtidos com a variação das taxas. O Modelo 3 foi adotado para simular equipamentos elétricos de sistemas de potência com dados obtidos na CELESC e ELETROSUL.

Os resultados das simulações mostrados a seguir são para um equipamento com vida média de 14 anos e duração da reforma após o desgaste total do equipamento ( $1/\mu_1$ ) variando entre 8 a 48 horas. Os valores dos tempos assumidos nestas simulações são mostrados na Tabela 5.6 e representam valores médios estimados, obtidos através da experiência de alguns engenheiros da CELESC e ELETROSUL.

A Figura 5.3a mostra a influência da duração da manutenção preventiva ( $1/\mu_m$ ) no comportamento do OTTM. Observa-se que quanto maior a duração da manutenção preventiva,

maior o OTTM encontrado para um mesmo valor de  $1/\mu_1$ . Além disso, o aumento da duração da manutenção preventiva torna o OTTM ainda mais insensível à duração da reforma após a falha por desgaste. Para valores pequenos de duração da reforma após o desgaste, o OTTM torna-se próximo do valor do tempo para falha por desgaste. Isto indica que, se tempo de restauração após a falha é pequeno (por exemplo, tempo necessário para realizar uma substituição), é mais vantajoso, sob o ponto de vista da disponibilidade, esperar a quebra do equipamento para restaurá-lo (ou trocá-lo) do que realizar a manutenção preventiva. Este comportamento torna-se ainda mais acentuado, se a duração das manutenções preventivas torna-se maior.

A Figura 5.3*b* mostra o aumento da indisponibilidade (em horas/ano). Na Figura 5.3*b*, pode-se observar que para o modelo Markoviano adotado, a indisponibilidade do equipamento é pouco sensível às durações das manutenções, principalmente para reformas após o desgaste com durações de até 23 horas. Isto significa que se a duração da manutenção preventiva é maior, a frequência das manutenções preventivas pode ser reduzida sem que isso acarrete em grandes aumentos de indisponibilidade para o equipamento.

Foi observado na Tabela 5.1 que as falhas aleatórias e o reparo associado à estas falhas não influenciam o comportamento do OTTM no modelo de reparo mínimo após falhas aleatórias. A Figura 5.4 serve para ilustrar que o Modelo 3 também possui esta independência do OTTM em relação ao tempo para falhas aleatórias, por considerar o reparo mínimo após as falhas aleatórias. Os dados para estas simulações da variação de  $1/\lambda_0$  são mostrados na Tabela 5.7.

Tabela 5.6 - Dados do equipamento.

$1/\lambda_0$ (anos)	$1/\lambda_1$ (anos)	$1/\mu_0$ (horas)	$1/\mu_1$ (horas)	$1/\mu_m$ (horas)
10	14	4	8 a 48	3 a 10

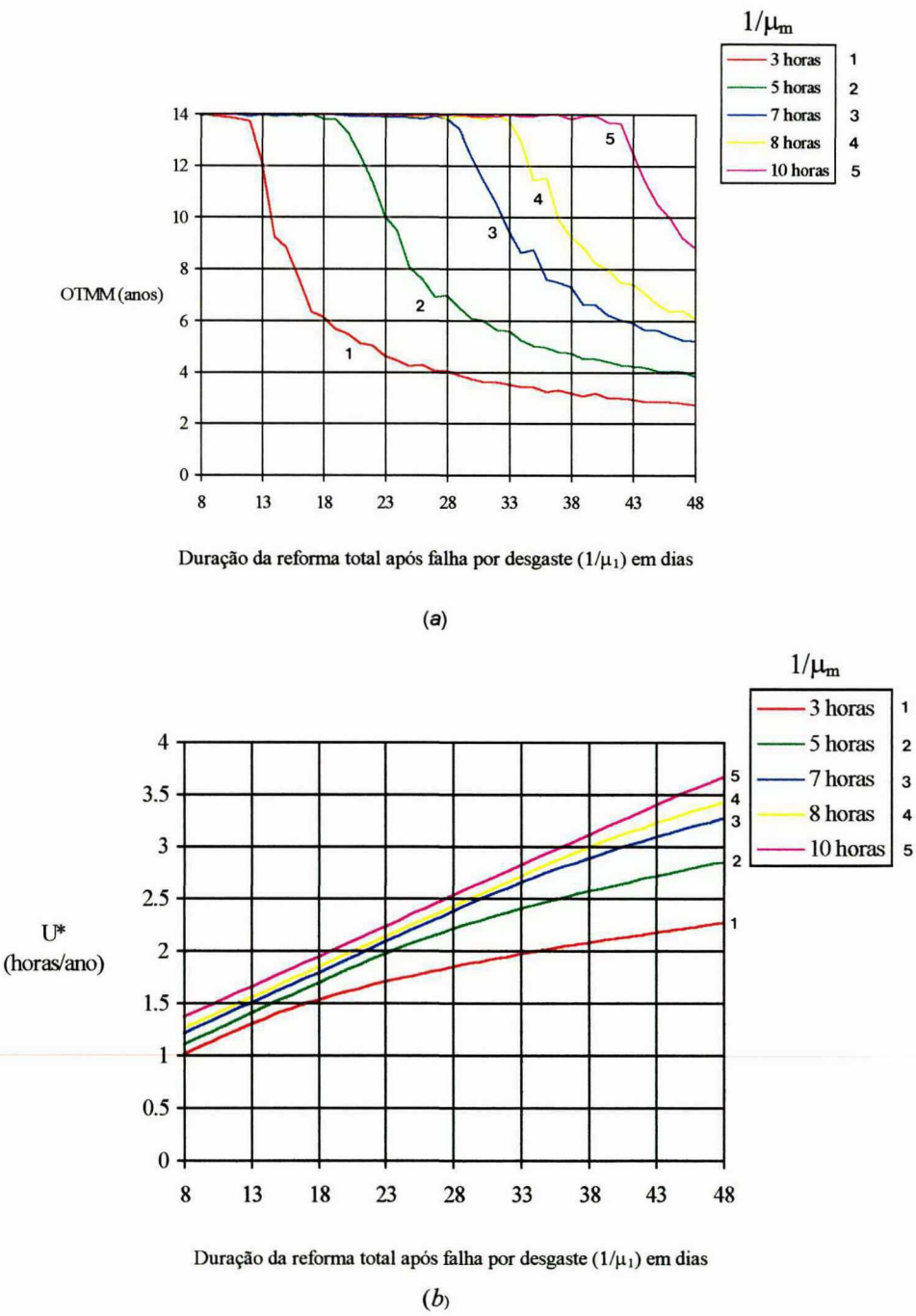
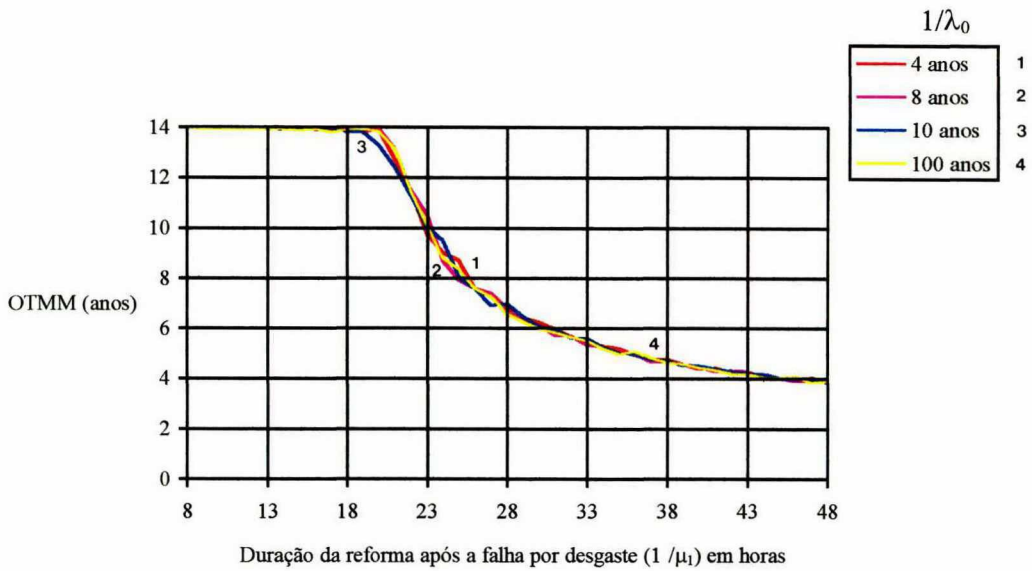


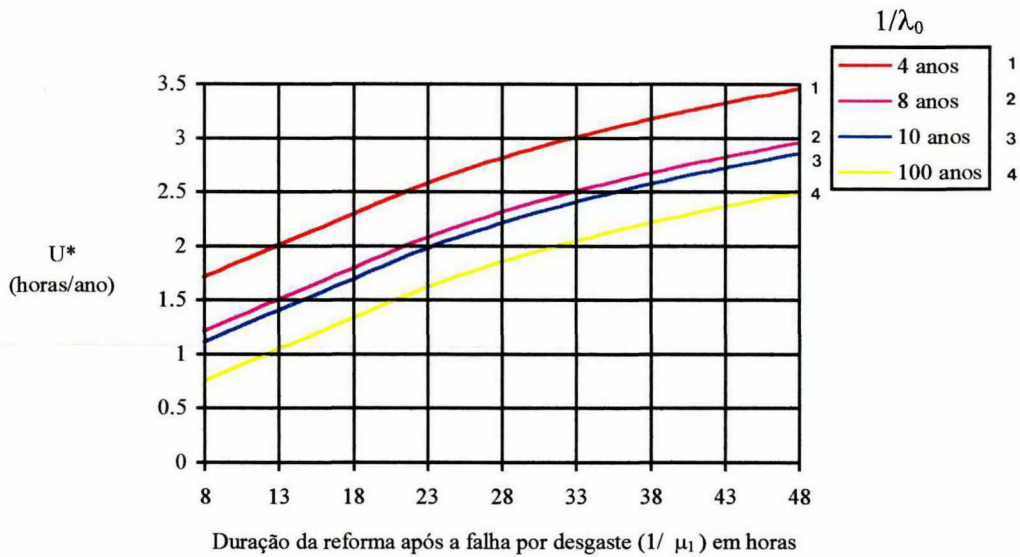
Figura 5.3 - a) Comportamento do OTTM para o Modelo 3, para diferentes valores de  $1/\mu_m$ ;  
b) Comportamento da indisponibilidade mínima do equipamento para diferentes valores de  $1/\mu_m$ .

Tabela 5.7 - Dados do equipamento.

$1/\lambda_1$ (anos)	$1/\mu_0$ (horas)	$1/\mu_m$ (horas)	$1/\mu_1$ (horas)	$1/\lambda_0$ (anos)
14	4	5	8 a 48	4 a 100



(a)



(b)

Figura 5.4 - a) Comportamento do OTTM no Modelo 3, para diferentes valores de  $1/\lambda_0$  ;  
b) Comportamento da indisponibilidade mínima do equipamento para diferentes valores de  $1/\lambda_0$ .



Como pode ser observado na Figura 5.4a, o OTTM não é sensível às falhas aleatórias no Modelo 3, uma vez que as curvas ficaram sobrepostas para diferentes valores de  $1/\lambda_0$ . As indisponibilidades mínimas, no entanto, são afetadas, pois aumentando-se o tempo para falha aleatória, as probabilidades do equipamento estar falhado devido a estas falhas diminuem, ocasionando um acréscimo na disponibilidade.

#### 5.2.4 - Análise do Modelo 4:

O Modelo 4, é uma adaptação do Modelo 3, no qual, na ocorrência de uma falha aleatória, são realizados pequenos ajustes juntamente com o reparo mínimo, aproveitando-se do fato do equipamento encontrar-se fora de operação. Estes ajustes não melhoram necessariamente as condições do equipamento, mas reduzem a necessidade da manutenção preventiva, reiniciando a contagem para a próxima manutenção preventiva. Desta forma, procura-se reduzir a indisponibilidade do equipamento, reduzindo o número de saídas programadas.

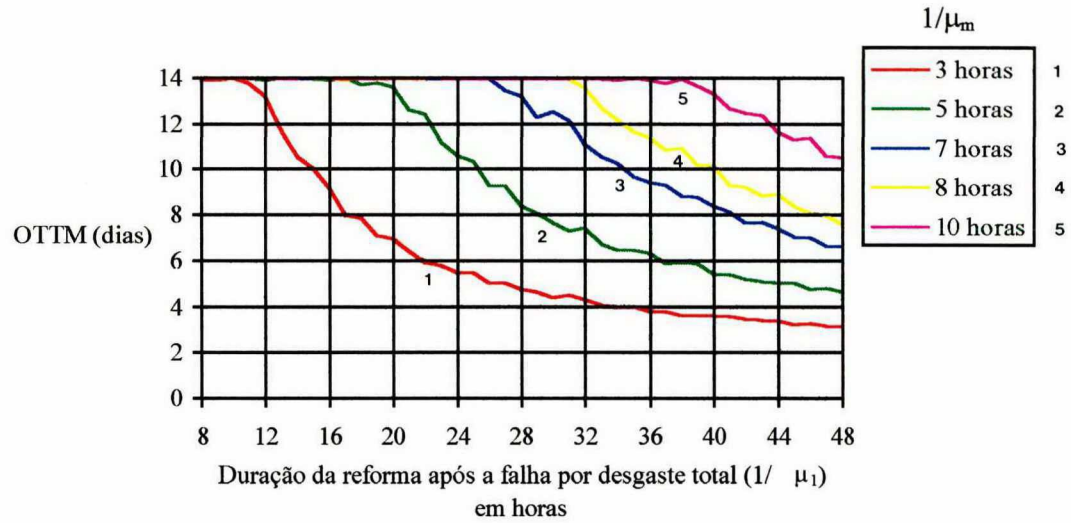
Na Figura 5.5, pode ser observado o comportamento do OTTM para diferentes valores de duração da manutenção preventiva. Os dados do equipamento simulado são mostrados na Tabela 5.8. Comparando-se a Figura 5.5a com a Figura 5.3a, constata-se que os valores do OTTM foram maiores para o Modelo 4, principalmente para grandes valores de duração da manutenção preventiva. Se estes intervalos entre as manutenções preventivas tornam-se maiores, pode-se esperar que a indisponibilidade do equipamento irá diminuir, devido ao decréscimo na probabilidade de ocorrência dos estados de manutenção preventiva. Este comportamento da indisponibilidade mínima ( $U^*$ ) pode ser observado comparando-se as Figuras 5.3b e 5.5b.

No Modelo 4, apesar de não ser realizada uma reforma completa no equipamento, na ocorrência de falhas aleatórias, a frequência destas falhas passam a ter uma influência no OTTM, uma vez que durante o reparo para a falha aleatória, são realizados ajustes e eliminação de defeitos no equipamento. Assim, na Figura 5.6a é mostrado o comportamento do OTTM com a

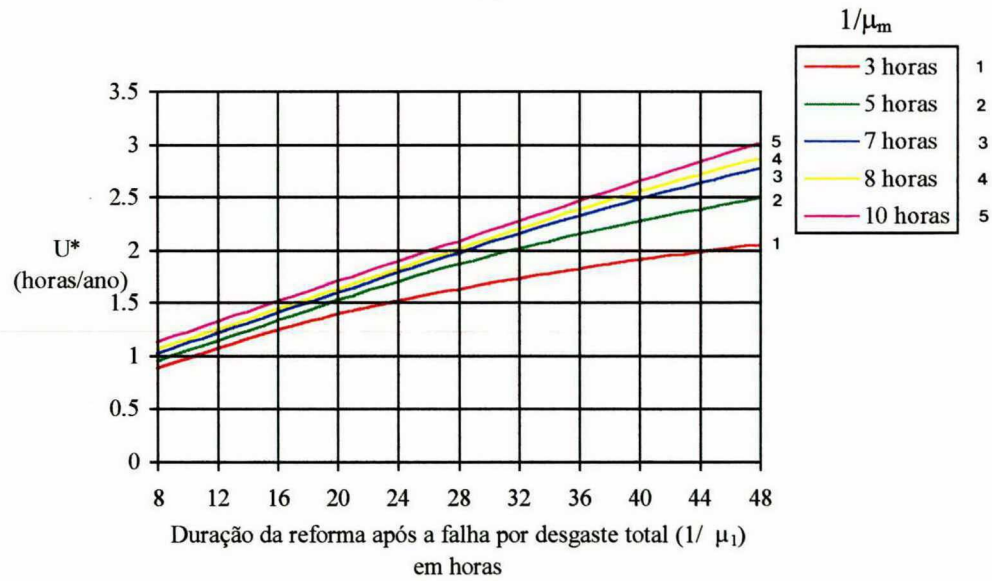
variação do tempo para falha aleatória. Os dados para estas simulações são mostrados na Tabela 5.9.

Tabela 5.8 - Dados do equipamento.

$1/\lambda_0$ (anos)	$1/\lambda_1$ (anos)	$1/\mu_0$ (horas)	$1/\mu_1$ (horas)	$1/\mu_m$ (horas)
10	14	4	8 a 48	3 a 10



(a)

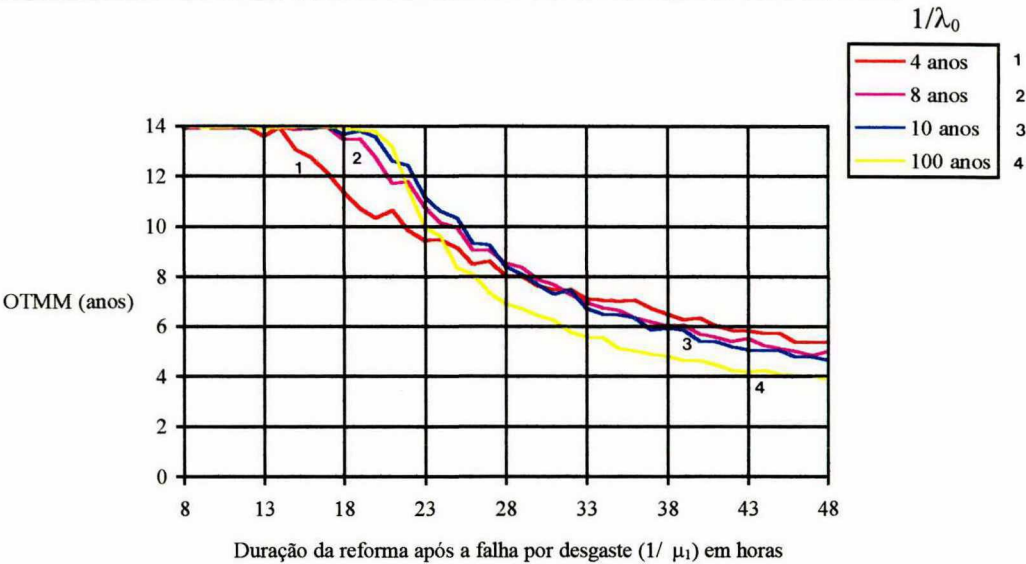


(b)

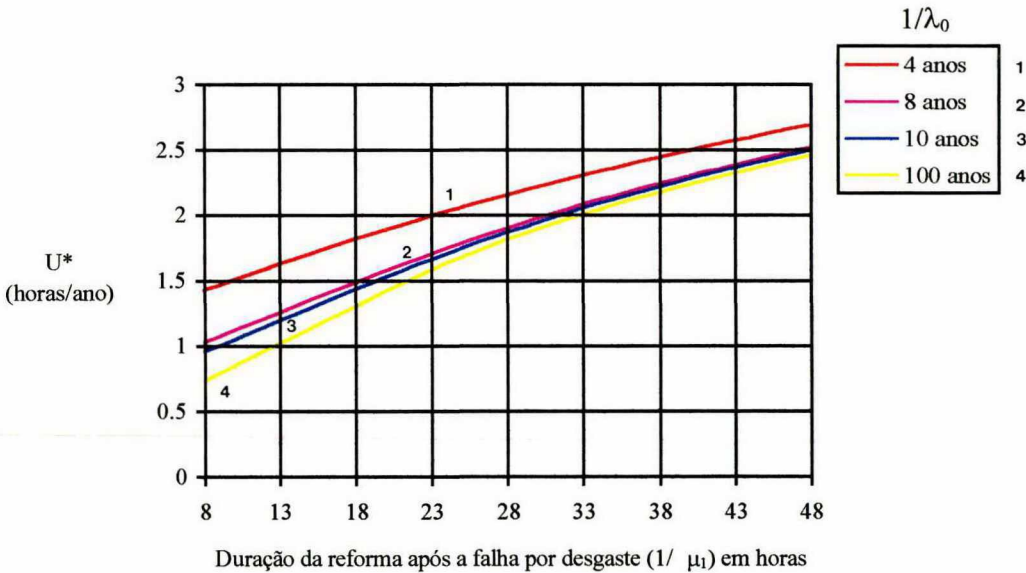
Figura 5.5 - a) Comportamento do OTTM no Modelo 4 para diferentes valores de  $1/\mu_m$ ;  
b) Comportamento da indisponibilidade mínima do equipamento para diferentes valores de  $1/\mu_m$ .

Tabela 5.9 - Dados do equipamento.

$1/\lambda_1$ (anos)	$1/\mu_0$ (horas)	$1/\mu_m$ (horas)	$1/\mu_1$ (horas)	$1/\lambda_0$ (anos)
14	4	5	8 a 48	4 a 100



(a)



(b)

Figura 5.6 - a) Comportamento do OTTM no Modelo 4 para diferentes valores de  $1/\lambda_0$  ;  
b) Comportamento da indisponibilidade mínima do equipamento para diferentes valores de  $1/\lambda_0$ .



Comparando-se a Figura 5.6a com a Figura 5.4a, observa-se que no caso do Modelo 4, o OTTM é sensível às falhas aleatórias, apresentando um comportamento diferente para cada valor de tempo para falha aleatória.

### 5.3 - Utilização do Modelo 4 para representar Relés Eletromecânicos

O Modelo 4 também foi utilizado para representar relés de distância eletromecânicos. Estes equipamentos em subestações do sistema elétrico da ELETROSUL, possuem geralmente um elemento sobressalente (unidade stand-by), e na ocorrência de falhas aleatórias, estas unidades stand-by são ativadas. Assim, o reparo após a falha aleatória perde a sua característica emergencial e durante este reparo, são feitos outros ajustes semelhantes aos procedimentos adotados nas ações de manutenção preventiva, aproveitando-se que o equipamento já está fora de operação.

Num trabalho em conjunto com engenheiros da ELETROSUL [25], utilizou-se o Modelo 4 para representar relés de distância eletromecânicos cujos processos de degradação da sua característica original de operação foram alterados pela troca dos capacitores a óleo (Askarel) por capacitores de poliéster metalizado MAC-FITA.

O Modelo 4 foi implementado agregando-se os vários custos (custo da manutenção preventiva e custo do reparo mínimo) associados às suas probabilidades de estado. Considerou-se o custo homem-hora (duração dos serviços de manutenção), o custo da troca de componentes durante a manutenção preventiva e o custo inicial do equipamento. O objetivo era avaliar a utilização dos capacitores de poliéster MAC-FITA, comparando os custos agregados a este capacitor com os custos agregados ao capacitor de óleo Askarel. O principal motivo para analisar o custo dos relés com capacitor a poliéster é a inexistência de fabricantes nacionais de capacitores a óleo Askarel, o que obriga a importação dos mesmos. Esta importação gera atrasos na reposição dos lotes de capacitores, causados pelos entraves gerados nos processos de importação.



Este método permitiu fazer uma análise probabilística dos gastos esperados com a manutenção preventiva do equipamento e fazer uma comparação entre dois tipos de equipamentos (com capacitor a óleo e capacitor a poliester) que possuam características semelhantes, mas divergem em relação à frequência de suas manutenções.

O número de estágios de deterioração considerado no modelo adaptado também foi  $k=3$ . O valor de  $r$  (número de estágios até a manutenção preventiva) foi o mesmo adotado para o Modelo 3, ou seja,  $r=3$ . O Modelo 4 foi utilizado para os relés eletromecânicos pois, na ocorrência de uma falha aleatória no circuito do relé, durante o reparo do equipamento, são realizados testes e ajustes semelhantes aos realizados na manutenção preventiva periódica e a contagem do tempo para a próxima manutenção preventiva é reiniciada. O objetivo deste procedimento é reduzir as saídas programadas do equipamento, diminuindo os custos com manutenção preventiva e reduzindo a indisponibilidade do equipamento.

Com a implementação computacional, fez-se uma análise econômica sobre os custos com a utilização de cada tipo de capacitor. Os dados sobre as taxas e os custos com manutenção e material de ambos relés são mostrados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Características das taxas e custos para relés com capacitor a poliester e a óleo.

<i>tipo de capacitor do relé (características)</i>	POLIESTER	ASKAREL
<i>Tempo para falha aleatória-<math>1/\lambda_0</math> (anos)</i>	3	10
<i>Duração do reparo após falha aleatória-<math>1/\mu_0</math> (horas)</i>	5	4
<i>Tempo para falha por desgaste-<math>1/\lambda_1</math> (anos)</i>	4	14
<i>Duração da reforma após falha por desgaste-<math>1/\mu_1</math> (horas)</i>	5	4
<i>custo inicial (R\$)</i>	5,00	20,00
<i>custo de material (R\$)</i>	5,00	20,00
<i>intervalo entre as manutenções preventivas-<math>1/\lambda_m</math> (anos)</i>	2	4
<i>duração da manutenção preventiva-<math>1/\mu_m</math> (horas)</i>	5	4

Na Tabela 5.10, o valor do tempo de manutenção devido ao desgaste ( $1/\mu_1$ ) representa o tempo estimado que a equipe de manutenção leva para executar uma troca dos capacitores após seu desgaste total. Cada vez que é feita uma manutenção nos relés com capacitores a políester, ocorre uma troca do conjunto de capacitores, representada por custo de material. Para o capacitor a Askarel, a troca dos capacitores ocorre a cada 14 anos (vida útil estimada). A vida útil considerada para os capacitores a políester é de 4 anos. O custo da mão-de-obra para a realização das atividades de manutenção preventiva é de R\$22,27, que representa o custo em homem-hora de uma equipe com dois técnicos em manutenção elétrica. O custo total da manutenção dos relés é calculado da seguinte forma:

Custo total da Manutenção = Custo inicial + Prob. de manutenção preventiva × homem-hora + Prob. de manutenção corretiva × homem-hora. + Custo com material nas manutenções

Os resultados das simulações são apresentados na Tabela 5.11 a seguir.

Tabela 5.11 - Resultados das simulações para relés com capacitor a políester e a óleo.

	POLIESTER	ASKAREL
Custo total da manutenção (R\$)	3516,84	848,27
Prob. de estar em manutenção (h/ano)	2,02	0,87
Prob. de estar falhado(h/ano)	1,67	0,42
Indisponibilidade (h/ano)	3,69	1,29

Observa-se na Tabela 5.11 que o custo da manutenção do relé com capacitor a óleo Askarel é muito menor do que o custo para o relé com capacitor de políester. A duração das manutenções preventivas no relé com capacitor de políester é maior ( 5 horas) e também é maior a frequência com que acontecem estas manutenções (de 2 em 2 anos). Como um grande fator de influência nos custos é o gasto em homem-hora, contabilizado nas atividades de manutenção preventiva, o relé com capacitor de políester apresenta um custo total de manutenção maior. A

indisponibilidade do relé com capacitor de poliester é cerca de três vezes maior (3,69 horas/ano contra 1,29h/ano). Suas manutenções preventivas devem ocorrer de 2 em 2 anos (contra uma freqüência para manutenções preventivas de 4 em 4 anos no relé com capacitor a óleo Askarel) e a duração maior destas manutenções preventivas acarretam uma probabilidade maior do relé estar indisponível. Deve-se salientar que os custos poderiam ser estimados manualmente, porém através deste modelo Markoviano, além da estimativa dos custos, pode-se determinar também as probabilidades de estar falhado ou em manutenção, ou seja, este é um método probabilístico de cálculo de custo esperado.

Como o método computacional também calcula a indisponibilidade média do equipamento durante toda a sua vida útil, causada tanto pelas falhas quanto pelas saídas programadas, analisou-se a variação dos custos em relação à duração da manutenção preventiva. A Tabela 5.12 apresenta os valores encontrados para um capacitor de poliester (durante sua vida útil de 4 anos ) de um relé eletromecânico, analisando dois valores de duração para a manutenção preventiva.

Tabela 5.12 - Variação da duração da manutenção para o capacitor de poliester.

<i>Duração da manutenção preventiva (horas)</i>	<i>Indisponibilidade (h/ano)</i>	<i>Custo total da manutenção (R\$)</i>
4	3.4	418.46
6	4.8	545.13

Atualmente a manutenção preventiva destes relés apresenta uma duração de quatro horas [27], o que representa um custo de cerca de R\$420,00 para cada relé com capacitor a poliester, num periodo de quatro anos. Valores como estes da Tabela 5.12, alertam como pode aumentar o custo da manutenção se a duração desta manutenção sofre um acréscimo (ao passar de 4 para 6 horas, por exemplo).

Na análise econômica, concluiu-se que, embora o capacitor a óleo seja mais difícil de ser adquirido, por ser um produto importado, os custos de manutenção dos relés com capacitor de



poliéster, a longo prazo, são maiores. O incremento em homem-hora tem um custo agregado considerável, apesar desta mão-de-obra estar sempre disponível.

Outra observação a ser efetuada é em relação ao treinamento das equipes de manutenção preventiva em relação à normatização das manutenções, que tendem a diminuir a duração das saídas programadas e seus custos associados, como pode ser observado na Tabela 5.12.

Por fim, estas análises podem ser expandidas para outros tipos de materiais, como por exemplo, relés com capacitores de polipropileno, que já estão sendo utilizados por outras empresas do setor elétrico.

#### 5.4 - Conclusões

Neste capítulo analisou-se a influência das falhas aleatórias e das falhas por desgaste para todos os modelos implementados. Com estas análises, conclui-se que uma política de manutenção preventiva que distingue os tipos de falhas vem a ser mais completa, pois reflete mais claramente quais são os problemas (ou as causas das falhas), permitindo a adoção de procedimentos mais adequados para solucionar estes problemas. Infelizmente, ainda não existe nas concessionárias uma base de dados de taxas de falha diferenciadas pelo tipo de falha. Ao contrário, adotam-se taxas de falha obtidas através de análises em amostras muito heterogêneas, resultando em valores com grandes discrepâncias entre si (incertezas), que não expressam realmente o processo de falha do equipamento. Assim, as políticas de manutenção preventiva tendem a adotar uma margem de segurança elevada em relação ao desgaste do equipamento, executando as manutenções preventivas em intervalos menores do que realmente seria necessário, e aumentando os custos da manutenção.

A influência da duração da manutenção preventiva também foi analisada, e conclui-se que se a duração da manutenção preventiva é maior ( o que implicaria em uma ação de manutenção

preventiva mais completa, incluindo testes e ensaios), o intervalo entre as saídas programadas para manutenções preventivas pode ser maior.

A representação dos estados dos equipamentos através dos processos de Markov se mostrou bastante flexível, permitindo analisar uma variedade de procedimentos que podem ser adotados numa situação de falha de um equipamento. Por exemplo, se um equipamento falha e durante a sua restauração é possível melhorar suas condições através de ajustes e eliminação de defeitos, ou mesmo através de uma substituição deste equipamento, pode-se fazer uma análise se realmente a manutenção preventiva é necessária. Talvez seria mais vantajoso esperar a quebra do equipamento para então realizar uma manutenção corretiva com ajustes, conservação e eliminação de defeitos. Nesta análise deve-se considerar os custos com as manutenções preventivas, a importância dos equipamentos dentro do sistema e a disponibilidade das equipes de manutenção. Algumas empresas já começaram a realizar procedimentos baseados neste tipo de análise [26].

Por último, a modelagem de equipamentos elétricos através de processos de Markov também pode ser utilizada para representar o funcionamento de equipamentos tais como relés de distância eletromecânicos. Neste caso, foi utilizado o Modelo 4, para permitir uma comparação entre os custos associados com a manutenção de relés com capacitor a óleo e a poliéster.

## Capítulo VI

### 6. Predição do MTBF para Sistemas Complexos.

#### 6.1 - Introdução.

O MTBF-*Mean Time Between Failure* ( tempo médio entre falhas ) é geralmente usado como uma medida da confiabilidade de um sistema reparável [16,21]. Predizer o MTBF é um importante aspecto no estágio inicial do desenvolvimento de um sistema e pode ser usado para avaliar o desempenho de sistemas já existentes

Neste capítulo é proposto um algoritmo para predição do MTBF de sistemas elétricos complexos com um número limitado de equipamentos (tal como acontecem em subestações), utilizando técnicas de Simulação Monte Carlo. Neste algoritmo estão incorporadas as saídas forçadas por falhas devido ao desgaste e as saídas programadas para manutenção preventiva de cada equipamento. Considera-se também a influência de falhas de causas aleatórias, através da probabilidade de ocorrência destas falhas. O algoritmo ainda incorpora a duração dos reparos após as falhas, duração das reformas/trocas de equipamentos e duração das manutenções preventivas.

Neste capítulo também são apresentados os resultados de algumas simulações computacionais para o cálculo do MTBF de um sistema teste. É feita uma comparação entre os resultados obtidos e as conclusões são apresentadas ao final do capítulo.



## 6.2 - Definição do MTBF

É comum definir o MTBF a partir do MTTF-*Mean Time to Failure* (tempo médio para falhas). O MTTF para uma amostra de vários equipamentos pode ser definido por:

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (6.1)$$

onde  $n$  é o número de equipamentos observados e  $t_1, t_2, \dots, t_n$  são os tempos para falha de cada equipamento.

No caso de um único equipamento o MTTF pode ser definido como o valor esperado da variável aleatória tempo para falha ( $t$ ) com função densidade  $f_t(t)$  [27]:

$$MTTF = E\{t\} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (6.2)$$

Se a variável tempo para falha é modelada pela distribuição exponencial, onde  $\lambda$  é a taxa de falhas, tem-se:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (6.3)$$

ou seja, a taxa de falhas é inversamente proporcional ao tempo médio para falha, ou tempo médio de vida.

Em sistemas elétricos de potência os equipamentos e o próprio sistema estão sujeitos à renovação através da troca ou reparo de componentes e equipamentos. Para incorporar os tempos de reparo e de reforma dos equipamentos, representando o seu funcionamento após as falhas, utiliza-se o MTBF, associando-se ao MTTF o MTTR-*Mean Time to Repair* (tempo médio de reparo). Assim, MTBF representa um ciclo de tempo na vida do sistema, sendo a soma do MTTF

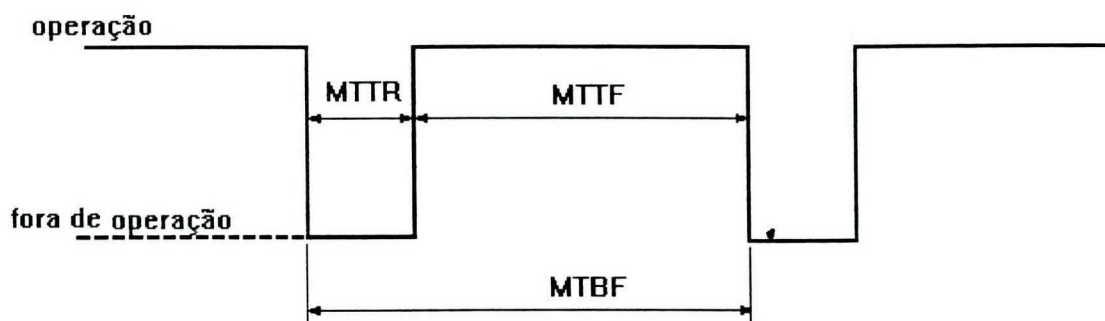


Figura 6.1 - Ciclo de operação de um sistema a dois estados (operação e fora de operação).

com o MTTR, como mostrado na Figura 6.1 [23]. Nestes termos, o MTBF pode ser calculado como:

$$\text{MTBF} = \text{MTTF} + \text{MTTR} \quad (6.4)$$

Em muitas aplicações o MTBF é utilizado no lugar do MTTF. Porém, é evidente na Figura 6.1 que existe uma diferença conceitual entre o MTBF e o MTTF. Em valores numéricos esta diferença depende do valor do MTTR. Na prática, o tempo de reparo é geralmente muito pequeno se comparado com o tempo de operação, e os valores do MTBF e do MTTF tornam-se próximos.

No modelo proposto em [14], o MTBF é definido conceitualmente como o MTTF, ou seja, o tempo de reparo é desprezado. O MTBF é calculado para sistemas complexos com  $n$  elementos, num dado intervalo de tempo  $[0, t]$ . **Sistemas complexos** são sistemas que não são série ou paralelo, mas que podem ser representados por uma combinação de elementos em série e em paralelo a qual resulte num número limitado de caminhos mínimos.

Por **caminho mínimo** entende-se qualquer seqüência mínima de elementos de um sistema que, conectados em série, asseguram a operação do sistema [23]. Se o sistema é representado através de um diagrama de blocos, cada caminho mínimo do sistema será uma seqüência mínima e diferente de blocos entre a entrada e a saída do diagrama. Conseqüentemente, como os blocos

estão em série, uma falha acontece em um caminho mínimo se qualquer um dos seus elementos falha. Contudo, para ocorrer uma falha no sistema, todos os caminhos mínimos devem falhar, logo, os caminhos mínimos podem ser representados no diagrama de blocos como conectados em paralelo, embora o conceito de sistema paralelo não possa ser usado, porque um mesmo elemento pode aparecer em dois ou mais caminhos mínimos.

Para a definição do MTBF em [14] foram feitas as seguintes hipóteses:

- (h1) O sistema é complexo e composto por  $n$  elementos. Cada elemento e o próprio sistema está ou operando ou falhado;
- (h2) O sistema possui mais de um caminho mínimo;
- (h3) Os tempos para falha de cada elemento são independentes;
- (h4) Os elementos falhados são trocados somente após a falha total do sistema;
- (h5) O tempo para troca ou reparo de qualquer elemento é desprezado.

Assim o MTBF foi definido pela equação abaixo, para o intervalo de tempo  $[0, t]$ :

$$MTBF\{t\} = t / E\{ N(t) \} \quad (6.5)$$

onde  $N(t)$  = número de falhas do sistema até  $t$  e  $E\{ N(t) \} > 0$

Embora a hipótese (h4) não seja realista para sistemas elétricos nos quais os equipamentos falhados são trocados ou reparados imediatamente após a falha individual, independente do sistema ter falhado ou não, esta hipótese foi adotada em [14] para facilitar a análise das propriedades do MTBF, sendo novamente considerada no algoritmo KLMC [15]. Esta consideração torna-se verdadeira para sistemas fechados (por exemplo, um equipamento lacrado e os componentes em seu interior), nos quais o reparo só é efetuado quando o sistema cessa sua operação, e não quando ocorrem falhas individuais de componentes.

Por outro lado, se os elementos falhados de um sistema são trocados independentemente do sistema estar falhado, então o valor do MTBF deste sistema será maior do que o encontrado



pela definição anterior, como será mostrado com o algoritmo SIMUL a seguir. Isto significa que o resultado obtido através do algoritmo KLMC é um resultado conservativo.

### 6.3 - Algoritmos de Predição do MTBF

#### 6.3.1- Algoritmo KLMC:

O processo de determinação de valores numéricos para variáveis aleatórias com distribuição de probabilidade conhecida (ou assumida), é conhecido como sorteio de Monte Carlo. A partir de um número aleatório inicial, obtém-se um valor para a variável aleatória, gerado de acordo com a sua distribuição de probabilidade. Quando vários sorteios são realizados para um mesmo problema, tem-se a simulação Monte Carlo, que pode se apresentar como uma solução probabilística para problemas envolvendo modelos complexos e/ou com incertezas nos dados.

A partir da definição proposta para o MTBF em [14], é apresentado um algoritmo de simulação Monte Carlo seqüencial para estimar o MTBF [15] de sistemas complexos que possam ser descritos por um conjunto de caminhos mínimos.

Além disso, considera-se que estes sistemas como sistemas coerentes. Um **sistema** é **coerente** se a falha de um componente do sistema nunca melhora o desempenho deste sistema e a operação de um componente do sistema nunca piora seu desempenho [30].

O algoritmo apresentado simula os tempos de operação de cada elemento do sistema através de técnicas de sorteio Monte Carlo, sendo por isso chamado de algoritmo KLMC-Kim Lee Monte Carlo. Desta forma, não é necessário que os tempos entre as falhas do sistema sejam identicamente distribuídos, mas apenas que a distribuição para a variável aleatória tempo para falha de cada elemento seja conhecida. Assim, após o conhecimento dos caminhos mínimos do sistema, pode-se obter um valor para o MTBF de qualquer sistema elétrico no qual possam ser aplicadas as seguintes hipóteses:

- (h6) O sistema possui  $n$  componentes. Cada componente está operando ou falhado, assim como o sistema.
- (h7) A distribuição do tempo para falha de cada componente é conhecida.
- (h8) O estado de operação ou falha do sistema é determinado somente pelos estados de cada componente dentro da definição de sistema coerente.
- (h9) Os estados dos componentes são s-independentes.
- (h10) Os componentes falhados são trocados por componentes novos somente após a falha do sistema.
- (h11) Se um caminho mínimo é interrompido devido a um componente em falha, os componentes que pertençam a este caminho mínimo (e que não estejam incluídos em outros caminhos mínimos) cessam a sua operação até a falha do sistema.
- (h12) O tempo de troca para qualquer componente é desprezível. A troca ou reparo de qualquer componente não prejudica o sistema.

A seqüência de passos do algoritmo KLMC é mostrada na Figura 6.2 [28]. Para se obter um valor para o MTBF de um sistema complexo através de uma simulação, é necessário o conhecimento prévio dos caminhos mínimos deste sistema. Estes caminhos mínimos podem ser obtidos através de um algoritmo para determinação dos caminhos mínimos [29] baseado em teoria de Grafos. Este algoritmo calcula as trajetórias mínimas de uma rede (ou grafo) no qual há um ponto de saída e um ponto de chegada, e as trajetórias são todas as ligações possíveis entre estes dois pontos.

Na Figura 6.2, tem-se um exemplo de grafo. Os ramos deste grafo estão numerados e representam as ligações entre os pontos  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$ .  $A$  é o ponto de entrada do grafo e  $B$  é o ponto de saída. As trajetórias mínimas serão aquelas em que nenhum nó ou ponto de intersecção entre os ramos é atravessado mais de uma vez, ou seja, as trajetórias mínimas de um grafo são os caminhos mínimos de um sistema representado por este grafo.

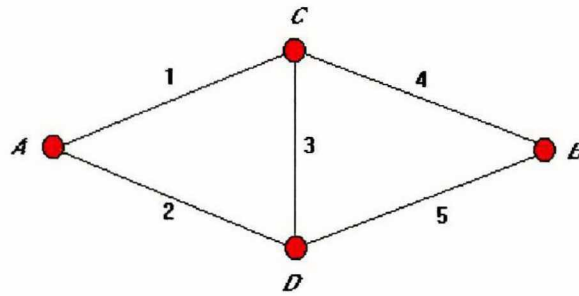


Figura 6.2 - Exemplo de Grafo com 5 ramos e 4 nós ou pontos de intersecção.

Neste caso, os caminhos mínimos deste grafo são dados pelas seqüências de ramos: (1, 4), (1, 3, 5), (2, 5) e (2, 3, <sup>4</sup>5).

Após a determinação dos caminhos mínimos do sistema, procede-se à simulação da operação, por um Tempo de Análise fornecido. Os tempos para falha de cada componente são obtidos através do sorteio Monte Carlo.

No algoritmo KLMC, o sorteio Monte Carlo pode ser realizado com a distribuição Uniforme, a distribuição Normal e a distribuição Weibull. Estas distribuições foram escolhidas por serem bem conhecidas e utilizadas em estudos probabilísticos de sistemas elétricos. Para obter um valor para o tempo para falha através do sorteio Monte Carlo usando a distribuição Uniforme, é necessário conhecer somente a média da distribuição. Se a distribuição escolhida para o tempo para falha é a distribuição Normal, além da média, é necessário também o desvio padrão. Para o sorteio com a distribuição Weibull, é necessário conhecer os valores dos parâmetros fator de forma e fator de escala da distribuição Weibull.



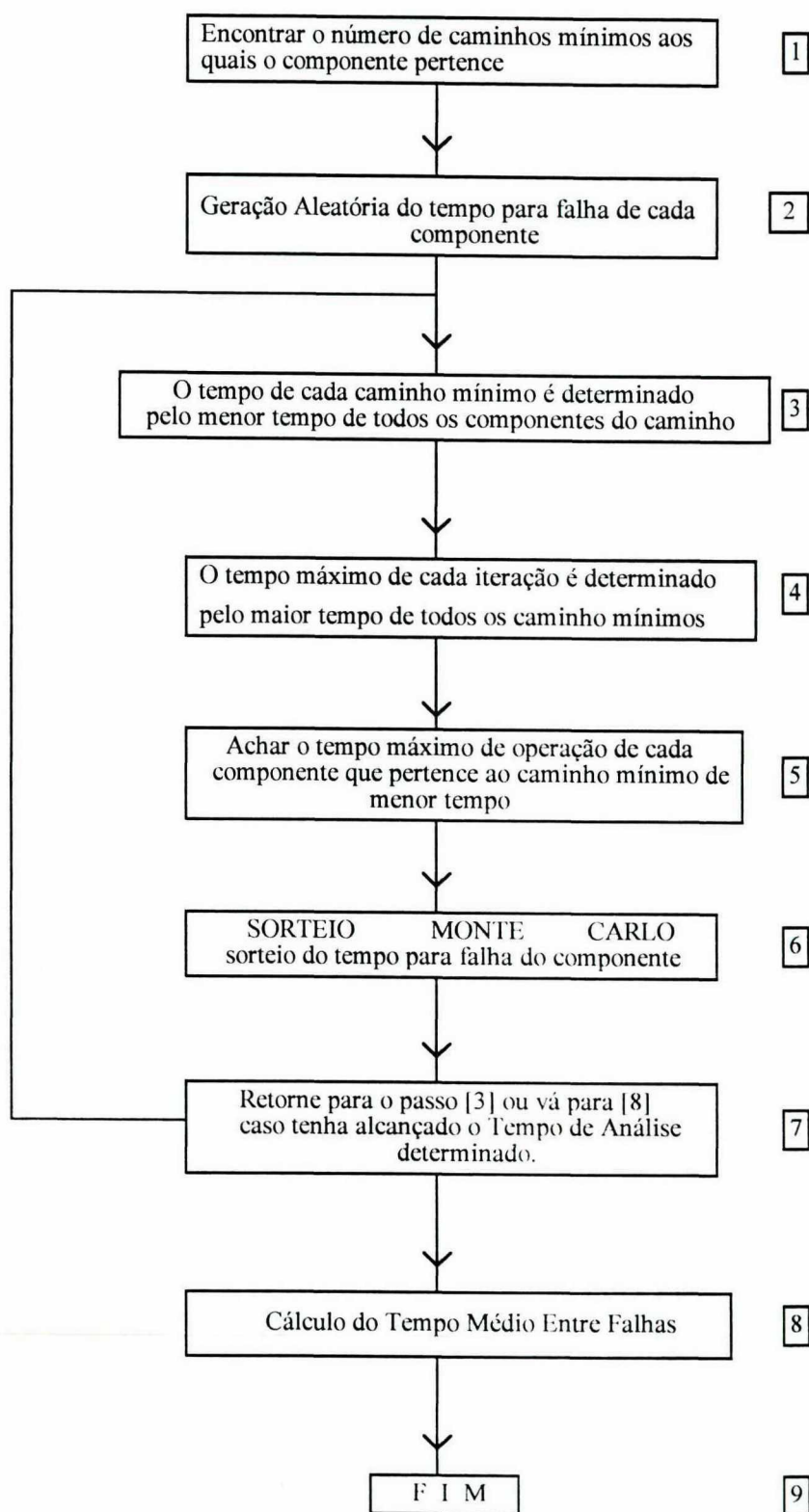


Figura 6.3 - Seqüência de passos do algoritmo KLMC para o cálculo do MTBF.

Durante a simulação computacional, o tempo máximo de cada iteração é determinado pelo maior tempo que o sistema pode operar, ou seja, até que todos os seus caminhos mínimos estejam interrompidos. Assim, contabiliza-se uma falha do sistema e inicia-se outra iteração. Nesta nova iteração, são sorteados novos valores de tempo para falha de todos os elementos que falharam na iteração anterior. Para os elementos que cessaram a sua operação porque pertencem a um caminho mínimo que falhou, o novo valor do tempo para falha será a diferença entre o tempo até a falha e o tempo que o caminho mínimo permaneceu operando na iteração anterior. Desta forma, cada elemento possui um tempo de vida que é incrementado somente quando o elemento está efetivamente em operação.

Todas as falhas do sistema são contabilizadas até o final da simulação. A simulação computacional é realizada até que o contador de tempo tenha atingido o Tempo de Análise, escolhido para a simulação. O MTBF do sistema é calculado no algoritmo a partir da definição (6.5):

$$\text{MTBF} = \text{Tempo de Análise} / N \quad (6.6)$$

onde N é o número de falhas do sistema até atingir o Tempo de Análise.

### 6.3.2- Algoritmo SIMUL:

O algoritmo SIMUL foi desenvolvido a partir da estrutura do algoritmo KLMC acrescentando vários procedimentos a esta estrutura, com o objetivo de aproximar a simulação computacional da operação real de um sistema elétrico de potência e predizer um valor para o MTBF deste sistema. O algoritmo SIMUL também utiliza técnicas de sorteio Monte Carlo sequencial para determinar valores para os tempos em operação de cada equipamento, sendo aplicável em sistemas nos quais os componentes deste sistema tenham definidos os tempos médios para falha por desgaste, taxa de falha aleatória e intervalo entre as manutenções preventivas. Intencionalmente, nesta versão atual, o algoritmo SIMUL foi desenvolvido para predizer o MTBF

de sistemas elétricos com um número limitado de equipamentos, de modo a não possuir um número muito grande de caminhos mínimos, o que poderia inviabilizar a utilização do sorteio Monte Carlo usual. Técnicas de redução de variâncias podem ser aplicadas para sistemas de maior porte [1, 30].

Para o algoritmo SIMUL foram consideradas as seguintes hipóteses, justificadas como se segue:

*(h13) O sistema possui um número fixo de equipamentos.*- Nesta hipótese considera-se que o sistema possui um número limitado e fixo de componentes, o que pode ser verdadeiro para sistemas elétricos de potência nos quais não ocorram mudanças na configuração do sistema. Assim, no algoritmo SIMUL, esta hipótese foi adotada pois permite a determinação antecipada dos caminhos mínimos do sistema. No caso de uma mudança topológica do sistema, novos caminhos mínimos deverão ser calculados.

*(h14) A operação de cada equipamento é representada por um modelo de Markov que considera os estados de falha por desgaste e os estados de manutenção preventiva do equipamento, além de considerar a probabilidade de falhas aleatórias para cada equipamento.*- No algoritmo SIMUL, cada equipamento é representado pelo modelo Markoviano mostrado no Capítulo 4, no qual são considerados os estados de degradação do equipamento devido ao uso, os estados de falhas de causas aleatórias e devido ao desgaste total e os estados em que o equipamento está fora de operação devido à manutenção preventiva. Embora para o cálculo do MTBF seja considerado apenas o tempo em que o equipamento está disponível, os estados em que o equipamento está em estado de falha, ou manutenção preventiva são diferenciados pelo algoritmo e procedimentos diferentes são adotados em cada caso.

*(h15) A distribuição dos tempos para as falhas é conhecida.*- Esta hipótese é necessária não apenas para o algoritmo KLMC, mas também para o algoritmo SIMUL, sendo adotada em ambos os casos. Os tempos para falha cada equipamento devido ao desgaste e os tempos para as saídas



programadas são obtidos através dos sorteios Monte Carlo, e para a realização destes sorteios é necessário estabelecer uma distribuição para a variável aleatória a ser sorteada.

*(h16) O estado de operação ou falha do sistema é determinado somente pelos estados dos equipamentos dentro da definição de sistema coerente.* - Esta hipótese determina que a operação de qualquer equipamento não pode piorar o sistema, e a falha de qualquer equipamento não pode melhorar o sistema.

*(h17) Os equipamentos são trocados/reparados/reformados imediatamente após a sua falha individual.* - Esta hipótese é verdadeira para sistemas de potência nos quais geralmente os equipamentos falhados são trocados ou reparados imediatamente após a falha individual, independente do sistema ter falhado ou não. Assim, para o algoritmo SIMUL, após a falha do equipamento devido à deterioração, o equipamento é reparado/trocado imediatamente após a sua falha individual, independente do sistema ter falhado ou não.

*(h19) O tempo de troca/reparo/reforma de cada equipamento é contabilizado.* - Como o equipamento é restaurado após sua falha, independente do sistema ter falhado ou não, a duração dos reparos/reformas ou trocas após as falhas por desgaste, passa a ser considerado durante a simulação. Porém, deve-se lembrar que, normalmente estas durações continuam sendo muito menores que o tempo para a falha por desgaste. Além disso, o sistema tem o seu número de caminhos mínimos reduzido durante o reparo, reforma ou troca de algum equipamento.

*(h20) Se um caminho mínimo é interrompido,, os equipamentos que pertençam a este caminho mínimo (e que não estejam incluídos em outros caminhos mínimos) cessam a sua operação até que o caminho mínimo interrompido retorne à operação.* - Isto significa que o tempo de vida de cada componente é incrementado apenas quando a componente está em operação. Se o componente deixa de operar porque pertence a um caminho mínimo que esteja interrompido (logo todas os componentes deste caminho não operam, pois por definição, os componentes de um

caminho mínimo são consideradas em série), seu tempo de vida permanece o mesmo até que a unidade retorne à operação.

*(h21) A ação da manutenção preventiva não causa a falha do sistema.* - Esta hipótese é uma restrição operacional, adotada para tornar o algoritmo mais próximo da realidade de operação de um sistema elétrico. No algoritmo SIMUL esta restrição significa que, para um sistema de  $m$  caminhos mínimos no qual todos os  $(m-1)$  caminhos mínimos estão interrompidos, nenhum equipamento do  $m$ -ésimo caminho mínimo pode entrar em manutenção preventiva até que qualquer outro caminho mínimo esteja restabelecido. Assim a manutenção preventiva é postergada para que não ocorra a falha no sistema devido à ação da manutenção preventiva, o que seria uma situação irreal. O maior tempo que esta manutenção preventiva é postergada corresponde ao menor tempo para o restabelecimento de qualquer outro caminho mínimo. A duração da manutenção preventiva, assim como os tempos de reparo/reforma ou troca dos equipamentos são fixos e no caso de uma falha do sistema, este permanecerá falhado até que se restabeleça a continuidade do fornecimento de energia, através de um ou mais caminhos mínimos.

*(h22) A ação da manutenção preventiva melhora as condições operativas do equipamento, reduzindo o seu desgaste.* - Esta hipótese estabelece que a manutenção preventiva melhora a condição do equipamento reduzindo o seu desgaste. Assim, após a manutenção preventiva, o tempo para que ocorra uma falha por desgaste aumenta, aumentando portanto a vida útil do equipamento. Este aumento do tempo da vida útil é obtido através de um incremento no tempo para falha por desgaste, após a ocorrência de cada manutenção preventiva. Este incremento foi considerado como 5% do valor do tempo médio para falha por desgaste (este valor foi escolhido hipoteticamente, devido à insuficiência de dados, portanto outros valores para o incremento no tempo para falha por desgaste podem ser utilizados). Assim, quanto maior o número de manutenções, maior será a vida útil do equipamento. Embora um incremento constante no tempo para falha por desgaste, não reflita as condições do equipamento no fim da sua vida útil, esta modelagem busca aproximar-se da modelagem de Manutenção Preventiva Mínima, adotada no



Capítulo 4, na qual o equipamento retorna à operação após uma manutenção preventiva, num estado de degradação menor ao que se encontrava antes da manutenção.

*(h23) A falha aleatória é detectada em intervalos pré-estabelecidos.* - A falha aleatória ocorre devido a causas externas em qualquer tempo, e portanto não deve ter uma distribuição na qual seus valores concentram-se ao redor de um tempo médio para falha aleatória. No algoritmo SIMUL, determina-se a ocorrência ou não da falha aleatória num equipamento, através da sua probabilidade de falha aleatória, calculada pela expressão:

$$P_{F0} = \lambda_0 / (\lambda_0 + \mu_0) \quad (6.7)$$

Com os valores das taxas de falha aleatória, calcula-se a probabilidade de falha aleatória de cada equipamento, através da expressão acima. Na ocorrência de cada manutenção preventiva no equipamento por exemplo, faz-se também um sorteio para verificar se ocorreu ou não uma falha aleatória (qualquer outra frequência de sorteios pode ser utilizada). Se o resultado do sorteio está dentro da faixa de probabilidade de falha do equipamento, então terá ocorrido uma falha aleatória, e a manutenção preventiva ocorrerá em conjunto com o reparo desta falha aleatória. Veja o exemplo numérico para um determinado equipamento do sistema:

Se  $1/\lambda_0 = 5000$  falhas/ano e  $\mu_0 = 10$  dias,

logo:  $P_{F0} = 1/5000 / (1/5000 + 1/10) = 0.0002 / 0.1002 = 0.01996$ .

A probabilidade de falha ou sucesso (não ocorrência de falha aleatória) será representada através de uma função densidade de probabilidade Uniforme. Se o sorteio com esta Uniforme (entre 0 e 1), fornecer um valor menor ou igual a 0.01996, significa que ocorreu uma falha aleatória e é feito um reparo para falha aleatória, juntamente com a manutenção preventiva. A duração deste reparo-manutenção preventiva é determinada pelo maior valor entre os valores de duração do reparo e duração da manutenção preventiva. Assim, considera-se neste caso, que a falha aleatória só é detectada durante a manutenção preventiva, isto é, a perda de continuidade do equipamento por falha aleatória só será detectada quando ocorrer este sorteio.

A estrutura do algoritmo SIMUL é mostrada na Figura 6.3.



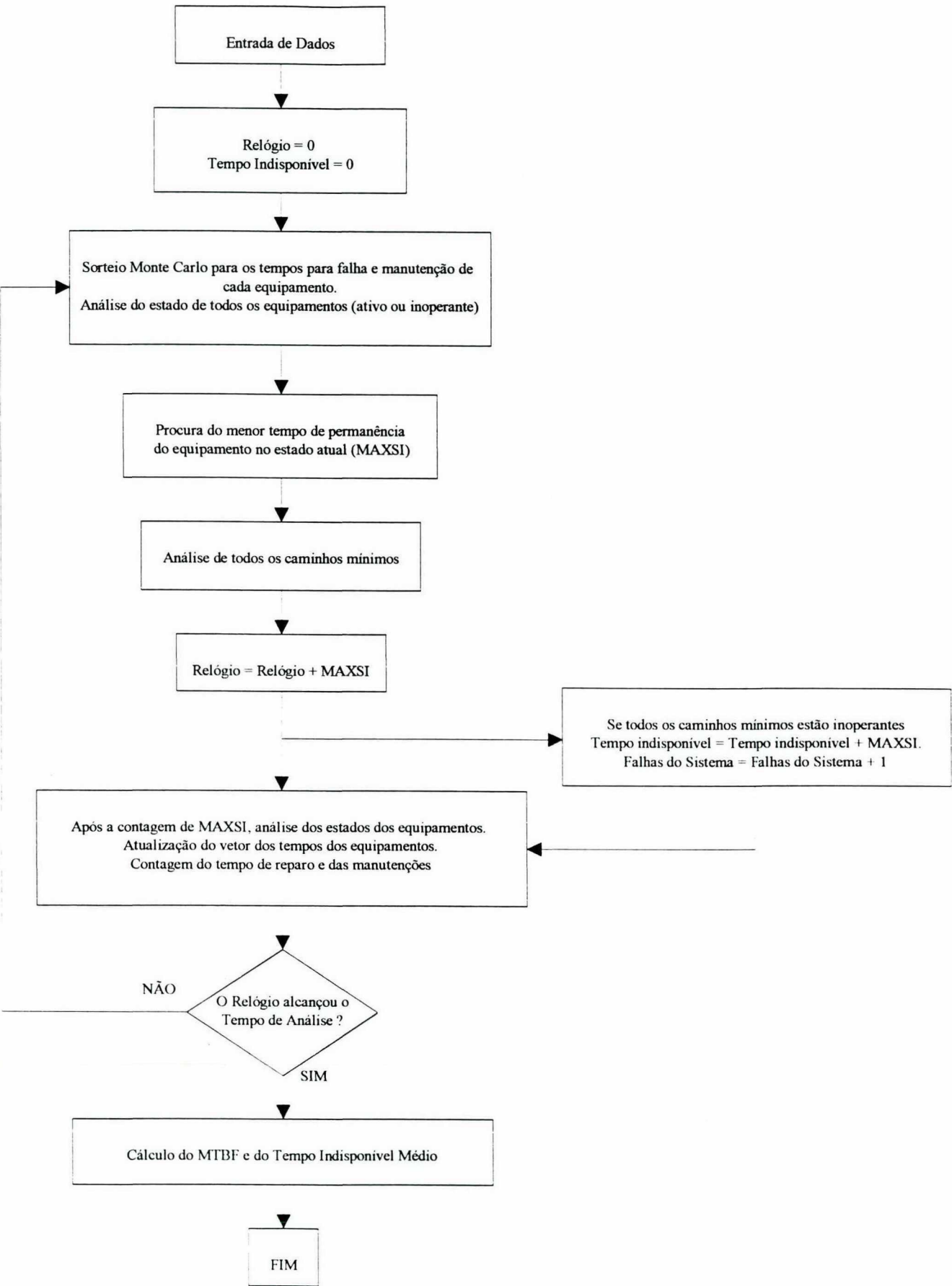


Figura 6.4 - Seqüência de Passos do algoritmo SIMUL.

Os sorteios Monte Carlo são realizados para obter os tempos para falha devido ao desgaste dentro de um certo intervalo. A distribuição assumida para estas variáveis aleatórias foi a distribuição Normal. No modelo Markoviano, descrito no Capítulo 4, o tempo para falha por desgaste do equipamento possui distribuição Erlang, porém, a curva da distribuição Erlang se aproxima da Normal com o aumento do parâmetro  $k$  (ver apêndice 1). Assim, considerou-se uma aproximação da distribuição Erlang pela distribuição Normal, utilizando distribuição Normal no sorteio Monte Carlo para representar os tempos para falha por desgaste. A manutenção preventiva é realizada no equipamento em intervalos com valores também sorteados através de uma distribuição Normal com pequenos desvios, representando uma pequena incerteza quanto à data da realização da manutenção preventiva. Estes valores também podem ser considerados fixos.

Os sorteios não são realizados para os tempos de duração dos reparos e das manutenções preventivas. Estes tempos são considerados determinísticos, assumindo que os procedimentos de reparo, reforma ou manutenção serão sempre os mesmos. Além disso, estas durações são muito menores do que os tempos para falha e os tempos para manutenção preventiva, sendo por isso desconsideradas as incertezas nestes valores.

## 6.4 - Análise das Simulações com os Algoritmos KLMC e SIMUL

### 6.4.1 - Descrição do Sistema-teste:

A fim de analisar a aplicação do algoritmo SIMUL, será utilizado o Sistema-teste, mostrado na Figura 6.5. A configuração deste sistema ilustra, de forma simples, a definição de um sistema complexo, pois não é uma configuração série ou paralela, sendo utilizado em muitas análises de configurações de sistema [29].

O grafo representativo deste sistema pode ser visto na Figura 6.2.

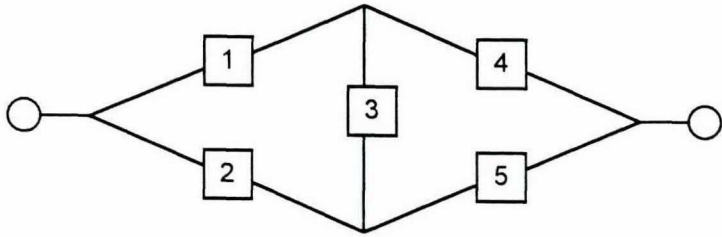


Figura 6.5 - Sistema-teste

No Sistema-teste, considerou-se que todos os equipamentos são iguais. Os valores adotados para os tempos para falha por desgaste, reparo após a falha por desgaste, tempo para falha aleatória e reparo após a falha aleatória, intervalo entre as manutenções preventivas e duração da manutenção preventiva dos equipamentos (nesta ordem) são mostrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Tempos dos equipamentos para o Sistema-teste.

$1/\lambda_1$	$1/\mu_1$	$1/\lambda_0$	$1/\mu_0$	$1/\lambda_m^*$	$1/\mu_m$
(dias)	(dias)	(dias)	(dias)	(dias)	(dias)
1000	14	500	7	215	1

6.4.2 - Análise de Convergência do Algoritmo SIMUL:

O algoritmo SIMUL utiliza técnicas de Simulação Monte Carlo seqüencial para obtenção do valor do MTBF de um sistema elétrico. Na Simulação Monte Carlo seqüencial, um processo estocástico é simulado pela amostragem das transições ao longo do tempo (durante um Tempo de Análise pré-determinado), de todas as variáveis aleatórias do sistema. [30]. Assim, quanto maior o conjunto de transições (número de sorteios) para cada variável do sistema, mais o resultado obtido na simulação se aproxima do valor médio esperado.

Para possibilitar a análise da convergência dos resultados obtidos em cada simulação computacional, o algoritmo permite que sejam realizadas várias simulações com um mesmo tempo de análise, variando-se apenas o valor aleatório inicial (semente para os sorteios Monte



Carlo). Os resultados obtidos em cada simulação computacional são armazenados em um vetor e calcula-se a média e o desvio padrão destes valores, como mostrado a seguir.

$$\text{media} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{MTBF}_i}{n}; \quad \text{Desvio Padrão} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{media} - \text{MTBF}_i)^2}{n}}$$

(6.8)

A Tabela 6.2 apresenta alguns resultados obtidos com o Sistema-teste, considerando uma incerteza de 10% nos dados de entrada da Tabela 6.1.

Tabela 6.2 - Análise da convergência do algoritmo SIMULA para o Sistema-teste, considerando 50 simulações.

<b>Tempo de Análise (anos)</b>	<b>Número de Simulações (n)</b>	<b>média (anos)</b>	<b>Desvio Padrão (%)</b>
5000	50	57,42	10,2
10000	50	57,19	7,8
20000	50	56,57	6,5
30000	50	56,41	4,0

Observa-se que o desvio padrão dos valores obtidos nas simulações com o algoritmo SIMUL diminui quando se aumenta o Tempo de Análise em cada simulação. Isto ocorre porque, aumentando-se o Tempo de Análise, aumenta-se o número de sorteios, logo a simulação representa melhor o comportamento de cada variável do sistema (cada equipamento), melhorando o resultado final, e reduzindo a diferença entre os resultados obtidos em outras simulações. Assim, quando se aumenta suficientemente o Tempo de Análise, não é necessário fazer mais do que uma simulação computacional, pois o resultado de uma única simulação será um resultado representativo de várias simulações, tornando-se independente do valor da semente (valor aleatório inicial).

Deve-se observar que a convergência do algoritmo é lenta, possuindo um custo computacional elevado. O tempo de CPU para uma simulação computacional varia com o Tempo de Análise escolhido, como mostrado na Tabela 6.4. Estes valores de CPU foram obtidos utilizando um computador PC-AT 486DX2, com clock de 50 MHz e memória RAM de 8MBytes.

Tabela 6.4 - Variação do tempo de CPU com a variação do Tempo de Análise para o Sistema-teste.

<b>Tempo de Análise (anos)</b>	<b>Tempo de CPU (segundos)</b>
<b>5000</b>	<b>33</b>
<b>10000</b>	<b>68</b>
<b>20000</b>	<b>137</b>
<b>30000</b>	<b>205</b>

Para um computador com maior capacidade de memória RAM e um clock mais rápido, o valor do tempo de CPU torna-se menor. Assim, é indicado utilizar métodos que auxiliem a convergência [30], antes de utilizar-se o algoritmo SIMUL em sistemas mais realistas.

#### 6.4.3 - Comparação entre os algoritmos KLMC e SIMUL:

Como foi apresentado anteriormente, o algoritmo KLMC considera algumas hipóteses simplificadas que nem sempre podem ser aplicadas em sistemas elétricos com vários equipamentos. Desta hipóteses, aquela que é mais distanciada da realidade destes sistemas é a que diz respeito ao reparo de todos os componentes serem efetuados de forma conjunta, ou seja, os componentes afetados por falhas individuais só retornam à operação após a falha total do sistema. Ainda assim, o KLMC, se aplicado a um sistema complexo, fornece um valor para o MTBF que é um limite inferior para o MTBF deste sistema.

O Sistema-teste foi simulado utilizando o algoritmo KLMC, para obtenção de um limite inferior para o MTBF deste sistema. Foram considerados como dados de entrada do algoritmo

KLMC, apenas os tempos para falhas por desgaste, assumindo uma distribuição Normal para estes tempos e desvio padrão de 10% em relação a seu valor médio. A Tabela 6.5 apresenta o resultado obtido em uma simulação utilizando o algoritmo KLMC e a Tabela 6.6 apresenta o resultado obtido utilizando o algoritmo SIMUL.

Tabela 6.5 - Resultados de uma simulação para o Sistema-teste com o algoritmo KLMC.

<b>Tempo de Análise</b> <b>(anos)</b>	<b>MTBF</b> <b>(anos)</b>	<b>número de falhas do</b> <b>sistema</b>
30000	1,72	17484

Tabela 6.6 - Resultados de uma simulação para o Sistema-teste com o algoritmo SIMUL.

<b>Tempo de Análise</b> <b>(anos)</b>	<b>MTBF</b> <b>(anos)</b>	<b>número de falhas do</b> <b>sistema</b>
30000	53,95	556

O MTBF obtido com o algoritmo KLMC é muito menor do que o MTBF obtido com o algoritmo SIMUL porque o número de falhas, no primeiro caso, é muito maior, uma vez que os componentes falhados são restaurados apenas após a falha geral do sistema. Como o algoritmo SIMUL considera o reparo dos componentes (equipamentos) falhados, independentemente da falha geral do sistema, reduz a possibilidade de ocorrer uma falha geral, diminuindo consideravelmente o número de falhas e aumentando o MTBF do sistema. Além disso, as manutenções preventivas melhoram as condições de cada equipamento, aumentando o tempo para falha devido ao desgaste e reduzindo também o número de falhas do sistema.

Verifica-se que o algoritmo SIMUL consegue representar os diferentes estados dos equipamentos de um sistema elétrico, analisando os estados de manutenção preventiva, estados de falha devido ao desgaste e os estados de restauração/troca do equipamento. Contudo, o MTBF



obtido se apresenta como um resultado muito otimista ao desconsiderar algumas situações que ocorrem em sistemas reais, como a de falha em um equipamento ocasionar a falha de outros equipamentos. Além disso, o algoritmo analisa o sistema apenas pela definição de sistema coerente, sem levar em consideração a capacidade de transporte (potência) de cada equipamento.

6.4.4 - Análise de sensibilidade do algoritmo SIMUL em relação à frequência e duração das manutenções preventivas:

Uma das hipóteses adotadas para o algoritmo SIMUL que causam um aumento do MTBF é a hipótese de que as manutenções preventivas melhoram o equipamento, postergando as falhas por desgaste, incrementando o tempo de vida útil do equipamento. Assim, quanto maior o número de manutenções no equipamento, mais tempo este equipamento levará para sofrer uma falha por deterioração. A influência no MTBF do intervalo entre as manutenções preventivas nos equipamentos, é mostrada na Tabela 6.7, na qual são considerados os mesmos dados do Sistema-teste (Tabela 6.1), variando-se apenas o intervalo entre as manutenções preventivas.

Tabela 6.7 - Comportamento do MTBF com a variação do intervalo entre as manutenções preventivas.

$1/\lambda_m$ (dias)	Tempo de Análise (anos)	MTBF (anos)	Número de falhas do sistema	Indisponibilidade (horas/ano)	Tempo de CPU (segundos)
107	50000	71,12	703	1,34	615
215	50000	56,05	892	2,19	341
430	50000	52,07	960	2,63	205

Da tabela anterior, pode-se constatar que diminuindo o intervalo entre as manutenções preventivas, houve um acréscimo no MTBF, pois reduziram-se as falhas devido ao desgaste. A Indisponibilidade do sistema também diminui, porque a duração da manutenção é de um dia, enquanto o reparo após a falha por desgaste dura 14 dias. Se ocorrem mais falhas, a Indisponibilidade do sistema será maior. Além disso, deve-se lembrar que a manutenção

preventiva não pode ocasionar diretamente a falha do sistema, de acordo com as hipóteses adotadas para o algoritmo SIMUL. Cada vez que um equipamento é retirado de operação para executar a manutenção preventiva, o caminho mínimo ao qual pertence o equipamento fica interrompido até que o equipamento retorne à operação. Porém, se apenas um caminho mínimo do sistema está disponível, a manutenção preventiva em qualquer equipamento deste caminho mínimo é adiada até que qualquer outro esteja disponível. Portanto, as manutenções preventivas, ainda que mais freqüentes, apenas melhoram o desempenho do sistema, quando se compara manutenções preventivas de mesma duração. Se a duração das manutenções preventivas aumenta, pode-se observar uma queda no valor do MTBF, causada pelo aumento da probabilidade de falhas no sistema. Este comportamento do MTBF pode ser observado na Tabela 6.8. São considerados os mesmos dados do Sistema-teste (Tabela 6.1), variando-se apenas a duração das manutenções preventivas.

Tabela 6.8 - Comportamento do MTBF com a variação da duração das manutenções preventivas.

<i>1/μ<sub>m</sub></i> <i>(dias)</i>	<i>Tempo de Análise</i> <i>(anos)</i>	<i>MTBF</i> <i>(anos)</i>	<i>Número de falhas</i> <i>do sistema</i>	<i>Indisponibilidade</i> <i>(horas/ano)</i>	<i>Tempo de CPU</i> <i>(segundos)</i>
0,5	50000	65,27	766	2,11	341
1	50000	56,05	892	2,19	341
2	50000	43,14	1159	2,31	355

Na Tabela 6.8 observa-se que diminuindo a duração das manutenções preventivas, reduz-se o número de falhas. Isto ocorre porque a manutenção preventiva retira o equipamento de operação (saída programada), reduzindo o número de caminhos mínimos do sistema. Se o número de caminhos mínimos é menor e o sistema permanece nesta condição desfavorável por um tempo mais prolongado, aumentam as chances do sistema falhar devido à falha por desgaste em algum equipamento que esteja em operação. Assim, manutenções preventivas otimizadas com durações menores reduzem a indisponibilidade dos equipamentos, melhorando o desempenho do sistema.



## 6.5 - Conclusões

Neste capítulo propôs-se um algoritmo para predição do MTBF de sistemas elétricos utilizando Simulação Monte Carlo. Neste algoritmo buscou-se incorporar as principais características dos sistemas elétricos e de seus equipamentos, tais como tempo de falha e reparo, e manutenções preventivas. No algoritmo SIMUL, considerou-se que cada manutenção preventiva acrescenta ao tempo para falha por desgaste do equipamento 5% do seu valor médio, aumentando, assim, seu tempo de operação. Este é um valor hipotético, porém um valor mais realista pode ser determinado pelo fabricante ou levantado em campo. As simulações computacionais demonstraram que o MTBF calculado pelo algoritmo SIMUL é sensível à frequência e duração das manutenções preventivas pois, quanto mais frequentes foram as manutenções preventivas, melhor foi o MTBF encontrado. Porém, se a manutenção preventiva melhora a condição dos equipamentos prolongando sua vida útil, também cria uma situação momentânea desfavorável para o sistema, reduzindo o número de caminhos mínimos do sistema devido à indisponibilidade do equipamento em manutenção. Assim, o algoritmo SIMUL representa o comportamento do MTBF em sistemas elétricos em relação à frequência e duração das manutenções preventivas nos equipamentos, indicando que as manutenções devem ser mais frequentes e com duração cada vez menor. Em situações reais, contudo, se o número de manutenções preventivas aumenta, o custo com a manutenção preventiva sofre um acréscimo considerável [25]. Por outro lado, a duração das manutenções preventivas também não pode ser reduzida indefinidamente. Portanto, é indicado a especificação destes valores de frequência e duração da manutenção preventiva através do cálculo do OTTM, como apresentado no Capítulo 4.

Uma possível limitação do algoritmo SIMUL para o cálculo do MTBF de sistemas reais é em relação ao esforço computacional. Para possibilitar a convergência de sistemas mais complexos e com tempo para falha dos equipamentos muito maior do que a duração do reparo após essas falhas, torna-se necessário aumentar o número de sorteios Monte Carlo, ou utilizar



técnicas que auxiliem a convergência do método. Deve-se considerar entretanto que a Simulação Monte Carlo é fácil de ser aplicada, produz uma grande quantidade de informações e pode ser usada para resolver problemas nos quais as soluções analíticas são difíceis de serem obtidas. É um método basicamente atraente devido à flexibilidade que possui, em oposição aos métodos analíticos mais restritos.

## **Capítulo VII**

### **7. Conclusões Gerais**

#### **7.1 - Introdução**

Neste capítulo serão apresentados as conclusões obtidas através do desenvolvimento do presente trabalho. Além disso, são listadas as principais contribuições deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

#### **7.2 - Conclusões Gerais**

A proposta inicial deste trabalho foi apresentar um método para obtenção de um intervalo ótimo entre as manutenções preventivas de equipamentos. Foi utilizado um modelo baseado em cadeias de Markov, para representar os vários estados de um equipamento reparável.

Neste modelo, as condições de operação dos equipamentos deterioram-se com o tempo de serviço, isto é, a deterioração é um processo no qual a condição do equipamento piora gradual e mensuravelmente, até levá-lo à falha por deterioração. Assim, o processo de falha do equipamento foi representado através de estágios intermediários de degradação até ocorrer a falha por degradação total. Esta modelagem das falhas por deterioração (ou desgaste total) apresentou vantagens em relação ao modelo a dois estados, comumente utilizado em estudos de Confiabilidade, porque é mais realista quando assume o envelhecimento do equipamento como um processo gradativo onde a transição do estado de perfeito funcionamento para o estado de falha não ocorre bruscamente. Além disso, essa modelagem permite analisar a influência das manutenções preventivas como um fator de retardamento para o processo de deterioração.

Além dos estados de falhas por deterioração, o modelo utilizado representa os estados de falhas aleatórias. Desta forma, o modelo de Markov se mostrou mais completo para representar equipamentos de sistemas elétricos, pois permite analisar separadamente a influência do desgaste e a influência de fatores aleatórios nos equipamentos, para a escolha de uma política de intervenções preventivas. É importante ressaltar que, embora a maioria das políticas de manutenção adotadas na concessionárias não distinguem as falhas por desgaste e as falhas aleatórias, analisando o processo de falha conjuntamente, a adoção de uma única taxa de falha para representar o processo de falha pode não ser um procedimento adequado para equipamentos de um mesmo lote, que estejam submetidos a condições diferentes.

Uma crítica freqüente na utilização de processos de Markov para representar equipamentos é que a distribuição exponencial pode não descrever adequadamente a transição de um estado de operação para um estado de manutenção preventiva, principalmente quando deseja-se obter uma faixa estreita em torno do valor médio do tempo para manutenção. Neste modelo de manutenção preventiva, a transição do estado de funcionamento para o estado de manutenção é dividida em estágios, resultando numa distribuição Erlang para os tempos para manutenção preventiva.

O modelo de Markov utilizado para representar equipamentos também se apresentou bastante flexível, pois são possíveis várias modelagens para representar os diferentes procedimentos a serem tomados numa situação de falha, por exemplo: reparo mínimo, reforma total ou troca. Qualquer outra condição intermediária pode ser modelada no modelo proposto, através da especificação de taxas de transição adequadas. As indisponibilidades dos equipamentos podem ser obtidas em cada caso.

Foi observado que a manutenção preventiva somente é eficaz quando predominam as falhas por deterioração. Em situações de predominância de falhas de causas aleatórias, deve-se estudar a melhor prática de restauração a ser adotada, ou reparo mínimo ou reforma. Nestes



casos, deve-se levar em conta o caráter emergencial da restauração, a confiabilidade do sistema, os custos, etc.

O modelo apresenta-se adequado para representar vários equipamentos elétricos, nos quais o processo de degradação é gradual e pode ser medido, e o tempo de reparo após a falha por deterioração é significativo. Foi implementado uma extensão do modelo Markoviano considerando o reparo mínimo após a falha aleatória, associado às atividades de manutenção preventiva. Assim, após o reparo, a contagem para a próxima manutenção preventiva é reiniciada. Esta adaptação foi utilizada para representar o funcionamento de relés de distância eletromecânicos, cujos processos de degradação da sua característica original de operação foram alterados pela troca dos capacitores a óleo por capacitores de políester. Esta adaptação permitiu avaliar a utilização dos capacitores de políester, comparando os custos agregados a este capacitor com os custos agregados ao capacitor de óleo, fazer uma análise dos gastos com a manutenção preventiva do equipamento e comparar os dois tipos de relés (com capacitor a óleo e capacitor a políester) que possuam características semelhantes, mas divergem em relação à frequência das manutenções.

Foi proposto também um segundo algoritmo, para predição do tempo médio entre as falhas de um sistema elétrico, num dado intervalo de tempo. Neste algoritmo, o cálculo do tempo médio entre as falhas considerou os tempos para falha por deterioração de cada equipamento, a duração do reparo, intervalo entre as manutenções preventivas e a duração da manutenção preventiva. Técnicas de Simulação Monte Carlo foram utilizadas para obter valores para os tempos em operação de cada equipamento, a partir dos valores médios dos tempos para falha por deterioração e do intervalo entre as manutenções. Foram assumidas algumas aproximações com o objetivo de aproximar a simulação computacional da operação real de um sistema elétrico e prever um valor para o tempo médio em operação deste sistema.

Das simulações com o algoritmo SIMUL conclui-se que as hipóteses adotadas são significativas e válidas. Porém reduzem a velocidade de convergência, sendo indicados métodos de auxílio à convergência, antes de considerar a simulação para sistemas maiores e mais realistas. Ainda assim, o algoritmo proposto demonstrou representar o funcionamento de um sistema elétrico (como definido no Capítulo 6). O MTBF calculado é sensível à frequência e duração das manutenções preventivas, indicando que as manutenções preventivas melhoram o desempenho dos equipamentos, mas aumentam a probabilidade de ocorrência de falhas do sistema, pois reduzem o número de caminhos mínimos. O valor obtido para o MTBF utilizando o algoritmo SIMUL, apresenta-se como um valor otimista por não considerar falhas conjuntas de equipamentos, as quais tendem a diminuir o valor real do MTBF. Outro importante aspecto, que deverá ser levado em consideração futuramente, são as falhas devido à insuficiente capacidade de transporte (potência) de cada equipamento. Com a introdução destes modos de falha no algoritmo, a simulação computacional fornecerá um MTBF mais próximo do desejado.

### 7.3 - Contribuições do trabalho

A seguir são listadas as principais contribuições que ficaram como produto do presente trabalho:

- apresentação de uma modelagem flexível para representar equipamentos de sistemas elétricos, na qual é possível representar vários procedimentos distintos adotados em situações de falhas e manutenção;
- estudo e implementação computacional de um método para o cálculo do intervalo ótimo entre as manutenções preventivas baseado no critério da maximização da disponibilidade do equipamento;
- avaliação da influência do desgaste nos equipamentos e das falhas de causas aleatórias em políticas de manutenção preventiva;

- extensão do modelo Markoviano considerando o reparo mínimo após a falha aleatória associado a atividades de manutenção preventiva, de modo que após o reparo, a contagem para a próxima manutenção é reiniciada e assim as saídas programadas são reduzidas;
- adaptação do algoritmo implementado para o cálculo do custo estimado a longo prazo em políticas de manutenção existentes ou a serem implantadas;
- avaliação comparativa da utilização de capacitores a óleo e a políester em relés de distância eletromecânicos, analisando os gastos com a manutenção preventiva do equipamento e comparando os dois tipos de equipamentos (com capacitor a óleo e capacitor a políester) que possuam características semelhantes, mas divergem em relação à frequência das manutenções e custos;
- proposta de um algoritmo de simulação para avaliar o desempenho de sistemas elétricos, através do cálculo do MTBF deste sistema.

#### 7.4 - Sugestões para Trabalhos Futuros

A fim de dar continuidade e possibilitar uma melhor utilização da metodologia desenvolvida neste trabalho, são feitas as seguintes sugestões:

- Uma das principais dificuldades na utilização do modelo Markoviano para representar equipamentos elétricos é a inexistência de dados, tais como valores de taxas de falha ou tempos médios para falha, discriminados em termos de falhas aleatórias e falhas por desgaste. Propõe-se que seja feita uma coleta de dados da ocorrência das falhas de equipamentos de potência e suas estatísticas, distinguindo os processos de falhas do equipamento, ou seja, identificando o processo de desgaste e das falhas aleatórias.
- Extensão do modelo de Markov, modificando o conceito quanto à reforma após o desgaste total do equipamento. Estas modificações tornariam o modelo mais realista, uma vez que



a reforma após o desgaste em sua definição, retorna o equipamento para o primeiro estado de deterioração, ou seja, suas condições são consideradas tão boas quanto as de um equipamento novo. Esta consideração é irreal, pois na prática, o desgaste não pode ser totalmente eliminado.

- Utilização do modelo para o cálculo do intervalo ótimo usando como critério de otimização os custos da manutenção e dos equipamentos, além da disponibilidade.
- Aplicar o algoritmo SIMUL em sistemas reais utilizando técnicas de redução das variâncias (incertezas) nos sorteios Monte Carlo.
- Acrescentar ao algoritmo SIMUL contingências duplas (falhas conjuntas) e restrições quanto à capacidade dos equipamentos do sistema. No algoritmo atual, a capacidade dos equipamentos é considerada infinita e o sistema falha somente se todos os caminhos mínimos estão interrompidos. A limitação da capacidade dos equipamentos possibilita um cálculo mais conservativo para o MTBF do sistema, pois considera também as falhas do sistema devido à insuficiência de capacidade dos equipamentos em atender o ponto de carga.

# Apêndice 1

## Distribuição Gamma

### 1. Introdução

Várias densidades de probabilidade importantes usadas em estudos de sistemas de potência são casos especiais da distribuição Gamma. Este apêndice tem por objetivo mostrar a expressão que define esta distribuição e alguns dos seus casos especiais mais conhecidos. Maiores detalhes podem ser encontrados nas referências [1], [4] e [24].

### 2. Distribuição Gamma

A distribuição Gamma pode ser expressa em termos da seguinte equação:

$$f(x) = \frac{\lambda^\alpha \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda x}}{\Gamma(\alpha)}, \quad (\text{A.1})$$

sendo que  $f(x)=0$  para qualquer  $x \leq 0$  e  $\Gamma(\alpha)$  é o valor da função Gamma, definido pela equação:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (\text{A.2})$$

as constantes  $\alpha > 0$ ,  $\lambda > 0$  são parâmetros arbitrários, denominados respectivamente por fator de forma e fator de escala.

Se  $\alpha$  é um número inteiro e positivo, a função Gamma é da forma:

$$\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)! \quad (\text{A.3})$$

Os valores da média e variância para a distribuição Gamma são mostrados abaixo:

$$\mu = \alpha/\lambda \quad \text{e} \quad \sigma^2 = \alpha/\lambda^2 \quad (\text{A.4})$$

### 3. Casos Especiais da Distribuição Gamma

#### 3.1 - Distribuição Erlang:

A distribuição Erlang é um caso especial da distribuição Gamma quando  $\alpha$  (na equação A.1) é um número inteiro positivo. Seja  $\alpha = k$ , a função densidade da variável aleatória tempo com distribuição Erlang pode ser expressa como:

$$f_T(t) = \frac{\lambda_1^k \cdot t^{k-1} \cdot e^{-\lambda_1 t}}{(k-1)!} \quad (\text{A.5})$$

A família de curvas para a função densidade da variável aleatória tempo com distribuição Erlang é mostrada na Figura A.1.

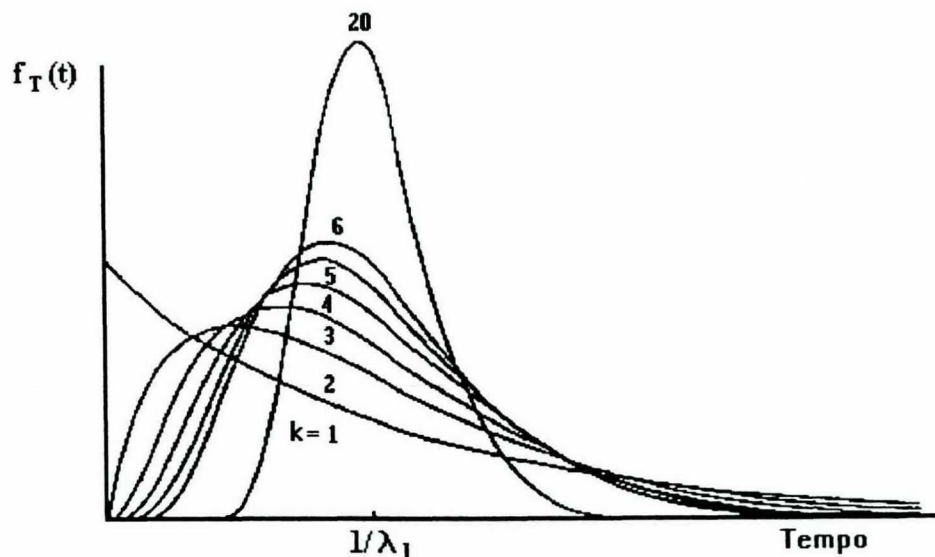


Figura A.1 - Família de curvas da distribuição Erlang para um mesmo valor do parâmetro  $\lambda_1$ .



### 3.2 - Distribuição Exponencial:

Se  $\alpha = 1$  (na equação A.1), tem-se a distribuição Exponencial e a função densidade da variável aleatória tempo pode ser expressa como:

$$f_T(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}, \quad \lambda > 0 \quad (\text{A.6})$$

## Referências Bibliográficas

- [1] ANDERS, G.J.- Probability Concepts in Electric Power Systems - Wiley Interscience, 1990.
- [2] BARLOW, R.E. & PROSCHAN, F.- Mathematical Theory of Reliability - John Wiley, New York, 1965.
- [3] NAKAGAWA, T. - *Imperfect Preventive Maintenance* - IEEE Transactions on Reliability, vol. 28, no. 5, december 1979, pp 402.
- [4] PARK, K.S. - *Optimal Continuous-Wear Limit Replacement under Periodic Inspections* - IEEE Transactions on Reliability, vol. 37, no. 1, april 1988, pp 97-102.
- [5] EBRAHIMI, N. - *Two New Replacement Policies* - IEEE Transactions on Reliability, vol. 42, no. 1, march 1993, pp 141-147.
- [6] SCHILLING, M. T. - *Aspectos da Confiabilidade de Sistemas Eletroenergéticos* - Tese de D. Sc. - COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Elétrica - Rio de Janeiro-RJ, dezembro de 1985.
- [7] CLARK, W.- *Analysis of Reliability Data for Mechanical Systems* - 1991 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposiom, pp 438-441.
- [8] DUCKETT, D. & DONOUGH, C.- *Deciding Whether to Replace or Refurbish a Transformer* - Power Technology International, 1991, pp 175-179.
- [9] MALIK, M.A.K. - *Reliable Preventive Maintenance Scheduling* - AIEE Transactions, vol. 11, september 1979, pp 221-228.

- [10] PROCTOR, C. L. & WANG, Y. T.- *Optimal Maintenance Policy for Systems that Experience States Degradations* - Microelectronics and Reliability, vol.14, no.2, 1975, pp199-202.
- [11] PIERUSCHKA, E.- *Principles of Reliability* - Prendice-Hall, Englewood Clifs, New Jersey, 1963.
- [12] SIM, S. & ENDRENYI, J.- *Optimal Preventive Maintenance with Repair* - IEEE Transactions on Reliability, vol. 37, no. 1, march 1988, pp 92-96.
- [13] SIM, S. & ENDRENYI, J.- *A Failure-Repair Model with Minimal & Major Maintenance* - IEEE Transactions on Reliability, vol. 42, no. 1, march 1993, pp 134-140.
- [14] KIM, C. - *MTBF of a Complex Binary Coherent System* - IEEE Transactions on Reliability, vol. 38, no. 4, october 1989, pp 411-415.
- [15] KIM, C. & LEE, H. K. - *A Monte Carlo Simulation Algorithm for Finding MTBF* - IEEE Transactions on Reliability, vol. 41, no. 2, june 1992, pp 193-195.
- [16] SILVA, E. L. & MOROZOWSKI FILHO, M. - *Base de Dados para Estudos de Confiabilidade em Sistemas de Potência* - Documento de Terminologia- (SGC/GTCP/GCPS) - Versão Final de dezembro de 1987.
- [17] TAVARES, A.L. - *Filosofia da Manutenção - Controle de Manutenção por Computador* - Curso de engenharia de Manutenção de Subestações- CEMAN92-SE/SC Convênio Eletrobrás-UFSC.
- [18] SÁ, A.L. & NEPOMUCENO, P.R. - *Análise Cromatográfica de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante como Instrumento de Manutenção Preditiva* - 1o. Encontro Técnico sobre Manutenção Preditiva - GCOI - Subcomitê de Manutenção - Campinas-SP, 1989.



- [19] SILVA, E. L. - *Programação da Manutenção de Unidades Geradoras com Restrições de Transmissão - Uma Abordagem baseada em Técnicas de Programação Inteira* - Tese de D. Sc. - UFSC - Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Florianópolis-SC, outubro de 1994.
- [20] PAPOULIS, A. - *Probability, Random Variables and Stochastic Processes* - Mc Graw Hill, 1965.
- [21] CAMARGO, C.- *Confiabilidade Aplicada à Sistemas de Potência Elétrica* - Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1981.
- [22] CLARKE, A.B. & DISNEY, R.L. - *Probabilidade e Processos Estocásticos* - Tradução de Gildasio Amado Filho - Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1979.
- [23] BILLINTON, R. & ALLAN, R. N. - *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques* - Pitman Books, 1983.
- [24] ANDERS, G. J. & ENDRENYI, J. - *The Remaining Life of Electrical Insulation with Non-Exponential Times to Maintenance* - Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 1994, pp 309-313.
- [25] COELHO, J., COSTA, A. L., NICOLAZZI, E., SILVEIRA, A. - *Análise dos Custos da Manutenção em Relés de Distância Eletromecânicos Baseada em Modelo Markoviano* - - X Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - Camboriú-SC, 1995.
- [26] *Maior Disponibilidade* - Revista Manutenção & Qualidade, Ano 1, nº 2, junho de 1995, pp10-14.
- [27] BILLINTON, R. - *Power System Reliability Evaluation* - Gordon and Breach, Science Publishers, New York, 1970.

- [28] SILVA, C. S. - *Simulação de Taxas de Falhas para Determinar a Qualidade de Circuitos em Sistemas de Distribuição* - Relatório Parcial de Iniciação Científica-CNPq - UFSC - Graduação em Engenharia Elétrica - Florianópolis-SC, agosto de 1994.
- [29] GEHRKE, A. - *Alocação de Reforços em Sistemas de Energia - Método do Cortes Mínimos* - Tese de M. Sc. - UFSC - Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Florianópolis-SC, agosto de 1995.
- [30] CEPEL - *Manual de Metodologia do NH2* - CEPEL, 1993.